

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

**PROYECTO DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**“IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO
DIDÁCTICO PARA CONTROL DIFUSO DE
TEMPERATURA Y CAUDAL”**

WILMER BOLIVAR TIPANLUISA SARCHI

SANGOLQUI – ECUADOR

2012

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente proyecto de grado titulado **“IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO PARA CONTROL DIFUSO DE TEMPERATURA Y CAUDAL.”** Ha sido desarrollado en su totalidad por el señor **WILMER BOLIVAR TIPANLUISA SARCHI** con CI: 1721711370 como requerimiento practico a la obtención del titulo de **INGENIERÍA ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**, bajo la dirección de:

ING. VÍCTOR PROAÑO

DIRECTOR

ING. RODOLFO GORDILLO

CODIRECTOR

AGRADECIMIENTO

En primer lugar deseo expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a tres personas: Ing. Víctor Proaño, Ing. Rodolfo Gordillo e Ing. Paul Ayala, maestros que sin el apoyo, capacidad y paciencia, probablemente este trabajo no se habría sido de calidad.

A las autoridades del Departamento de Eléctrica y Electrónica DEE, quienes también pusieron su granito de arena para facilitar el desarrollo de esta tarea.

A todos mis compañeros y amigos que en algún momento me han preguntado: “¿Qué? ¿Y...? ¿Cuándo la terminas?”

A Gaby y Yadira que con sus risas y llantos han contribuido a hacer inolvidables estos años en la universidad.

Finalmente, quiero agradecer a mis padres y amigos por haber sido tan pacientes conmigo, gracias.

DEDICATORIA

Dedico esta ingeniería a mis padres, por sus consejos, sus valores, por la motivación

constante que me ha permitido ser una persona de bien, a Dios por haberme

permitido llegar a este momento tan especial en mi vida;

y a todos aquellos amig@s que me ayudaron

en todo momento.

PRÓLOGO

“¿Porqué utilizar control difuso?”. Se pueden resumir en cuatro razones que son analizados en esta misma sección:

1) El control difuso es una tecnología nueva y puede usarse para eliminar los reclamos de patentes de soluciones similares para problemas técnicos basadas en otra técnica diferente.

2) Se han realizado estudios que determinan que los consumidores quieren lógica difusa, porque la tratan como un sinónimo de alta tecnología.

3) El desarrollo de controladores difusos es más fácil de aprender y requiere menos personal que el desarrollo de controladores convencionales, lo que resulta en una producción más barata.

4) Los controladores difusos brindan mayor robustez que el control convencional.

Los controladores difusos se describen por reglas Si-Entonces, por lo cual brindan una representación del conocimiento sencilla y comprensible. Se pueden ver como un lenguaje de alto nivel, representado por reglas, que un compilador toma para generar un algoritmo de control. Es una ventaja que estrategias de control complejas, conocidas por operadores o ingenieros en forma de experiencia, puedan ser programadas y mantenidas de una forma sencilla y comprensible.

Por lo general se dice que los controladores difusos proveen mayor robustez, aunque no hay resultados de investigación que prueben que son más robustos que los

convencionales. Cuando la variación de parámetros de un proceso es parcialmente conocido, un controlador difuso puede ser diseñado para ser menos sensible a los cambios de tales parámetros, y así se obtiene un controlador más robusto que uno convencional. De esta forma la afirmación de que, son más robustos debe ser interpretado como pueden ser más robustos.

Debido a todos estos beneficios que ofrece la lógica difusa se la ha utilizado en la realización de este proyecto de grado para el control de caudal y temperatura en un módulo didáctico previamente realizado en un proyecto de grado anterior usando Matlab® y una tarjeta de adquisición de datos de National Instruments.

En el capítulo 1 se detalla los objetivos a cumplir y la definición del proyecto de grado.

En el capítulo 2 se detallan los instrumentos usados a si como también los conceptos básicos de la teoría difusa.

En el capítulo 3 se presenta el modelamiento matemático de la planta de temperatura y caudal y la elaboración del diseño del control difuso utilizan las herramientas de Matlab®, también la forma de hallar las ganancias para la obtención de un control PI difuso mediante un control PI clásico.

En el capítulo 4 se muestra las pruebas y resultados obtenidos por el control PI difuso a si como también una descripción de como se realizó el control usando Simulink.

En el capítulo 5 se encuentran las conclusiones obtenidas del proyecto, y las recomendaciones realizadas para las personas que utilicen los temas tratados en esta tesis.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO I:.....	1
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II:	4
MATERIALES Y MÉTODOS	4
2.1. Medidor De Flujo	4
2.1.1 Principio de funcionamiento	5
2.1.2 Características	6
2.1.3 Configuración de parámetros	6
2.2. Sensor de temperatura	7
2.2.1 Principio de funcionamiento	7
2.2.2 Características	8
2.2.3 Configuración de parámetros	9
2.3. Electroválvulas	9
2.3.1 Principio de funcionamiento	10
2.3.2 Características	10
2.4. Bomba de agua.....	11
2.4.1 Características bomba de agua	11
2.5. Bombas De Agua Sumergible	12
2.5.1 Características	13
2.6. Variador de frecuencia	14
2.6.1 Características	15
2.6.2 Configuración De Parámetros	15
2.6.3 Conexión	17
2.7. Niquelina	18
2.7.1 Características	19
2.8. Tarjeta de adquisición de datos	19
2.8.1 Características de la tarjeta PCI – 6221.....	20
2.8.2 Conector SCB-68	22
2.8.3 Cable NI SHC68-68-EPM.....	23
2.8.4 Distribución de Pines de la Tarjeta de Adquisición de Datos NI PCI 6221	24
2.9. Lógica Difusa	25
2.9.1 Introducción	25
2.9.2 Ventajas De La Lógica Difusa	26

2.9.3 Desventajas De La Lógica Difusa	26
2.9.4 Sistema Difuso	26
2.9.5 Conjuntos Difusos	28
2.9.6 Variables Lingüísticas	30
2.9.7 Funciones De Pertenencia	31
2.9.8 Sistemas De Lógica Difusa	31
2.9.9 Reglas	32
2.9.10 Fusificador.....	33
2.9.11 Motor De Inferencia Difusa	33
2.9.12 Defusificador	34
2.9.13 Modelos Difusos	36
2.9.14 Modelo difuso de ‘Mamdani’	36
2.9.15 Modelo difuso de ‘Takagi-Sugeno’	38
CAPÍTULO III	41
DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR DIFUSO	41
3.1. Modelamiento del sistema de Temperatura.....	41
3.1.1 Modelo del sistema de temperatura.....	44
3.2. Diseño del control de Temperatura	47
3.2.1 Especificaciones del Problema.....	48
3.2.2 Solución del Problema	48
3.2.3 Sintonización del controlador Pi difuso	49
3.2.4 Base de conocimiento:	56
3.3. Modelamiento del sistema de Caudal.....	58
3.3.1. Modelo de Caudal	59
3.4. Diseño del control de Caudal	65
3.4.1 Especificaciones del Problema.....	65
3.4.2 Solución del Problema	66
3.4.3 Sintonización del controlador Pi difuso	66
CAPÍTULO IV	73
INFORMACIÓN DETALLADA DEL SISTEMA CONSTRUIDO	73
4.1. Descripción del diagrama de conexiones físicas.....	74
4.2. Adaptación de las señales de control.....	76
4.3. Diagrama de bloques del sistema de control.....	77
4.5. Descripción del Software	78

CAPÍTULO V	85
PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	85
5.1. Eficiencia del control PI difuso	85
5.1.1 Criterio integral de error cuadrático, (CIEC)	85
5.2. Pruebas de funcionamiento del control de Temperatura.	88
5.3. Pruebas de funcionamiento del control de Caudal.	89
CAPÍTULO VI.....	90
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	90
6.1. Conclusiones	90
6.2. Recomendaciones.....	91
ANEXOS.....	92
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura. 2. 1. Sensor Siemens Sitrans F M Mag 5100 W y Símbolo.....	4
Figura. 2. 2. Transmisor Siemens Sitrans F M Mag 6000i y Símbolo.....	5
Figura. 2. 3. Inducción electromagnética	5
Figura. 2. 4. Sensor de temperatura Allen Bradley 873E y Símbolo.	7
Figura. 2. 5. Electroválvula de 1/4 de pulgada y Símbolo.	10
Figura. 2. 6. Bomba de agua POMPETRAVAINI MCM20161 y Símbolo.....	11
Figura. 2. 7. Bomba sumergible de agua y símbolo.	12
Figura. 2. 8. Variador de frecuencia Starvert iG5.	14
Figura. 2. 9. Tiempo de aceleración y desaceleración.....	16
Figura. 2. 10. Ajuste de frecuencia.....	17
Figura. 2. 11. Conexión del variador de frecuencia.	18
Figura. 2. 12. Resistencia eléctrica o niquelina.....	19
Figura. 2. 13. Conector SCB-68.....	23
Figura. 2. 14. Cable NI SHC68-68-EPM.	24
Figura. 2. 15. Distribución de Pines de la Tarjeta de Adquisición de Datos NI PCI 622.	24
Figura. 2. 16. Unión difusa.....	29
Figura. 2. 17. Intersección difusa.	29
Figura. 2. 18. Complemento difuso.....	30
Figura. 2. 19. Diagrama del motor de inferencia.....	34
Figura. 2. 20. Conjunto difuso resultante de un proceso de inferencia.	35
Figura. 2. 21. Configuración del Modelo de Mamdani.	37
Figura. 2. 22. Sistema Difuso Mamdani, Procesamiento General.....	37
Figura. 2. 23. Sistema Difuso Mamdani, Procesamiento Detallado.....	38
Figura. 2. 24. Regla difusa.	39
Figura. 2. 25. Sistema Difuso Sugeno, Procesamiento Detallado.....	40

Figura. 2. 26. Configuración del modelo difuso de Takagi-Sugeno.	40
Figura. 3. 1. Tanque de temperatura.....	42
Figura. 3. 2. Proceso térmico.....	45
Figura. 3. 3. Modelo no lineal.	46
Figura. 3. 4. Modelo lineal.	46
Figura. 3. 5. Respuesta del modelo matemático lineal y no lineal en el tiempo.	47
Figura. 3. 6. Diagrama de instrumentación	48
Figura. 3. 7. Configuración del modelo difuso de Takagi-Sugeno.	48
Figura. 3. 8. Representación del diagrama de bloques del sistema.	49
Figura. 3. 9. Respuesta estable a lazo abierto.....	50
Figura. 3. 10. Esquema de Control.....	51
Figura. 3. 11. Respuesta de la planta para un control proporcional en lazo cerrado.....	51
Figura. 3. 12. Lazo de control para la planta de temperatura.	53
Figura. 3. 13. Designación de las entradas y salida del controlador difuso.	54
Figura. 3. 14. Función de pertenencia del error.....	55
Figura. 3. 15. Función de pertenencia de la integral del error.....	55
Figura. 3. 16. Diagrama de bloques del voltaje en relación con el caudal.	62
Figura. 3. 17. Curva de respuesta del caudal en función del voltaje.	63
Figura. 3. 18. Modelo no lineal.	64
Figura. 3. 19. Respuesta en el tiempo del modelo matemático de la planta de caudal.....	64
Figura. 3. 20. Diagrama de instrumentación	65
Figura. 3. 21. Representación del diagrama de bloques del sistema.	66
Figura. 3. 22. Respuesta en lazo cerrado para una ganancia $k=3$	67
Figura. 3. 23. Lazo de control para la planta de Caudal.....	69
Figura. 3. 24. Definición de las entradas y salidas en la interfaz gráfica de usuario Fis.....	69
Figura. 3. 25. Función de pertenencia del error.....	69

Figura. 4. 1. Diagrama General de Componentes Del Sistema.....	73
Figura. 4. 2. Terminales usados para el control difuso.....	75
Figura. 4. 3. Diagrama de conexiones.....	76
Figura. 4. 4. Conversor de corriente a voltaje.	77
Figura. 4. 5. Diagrama De Bloques Del Sistema De Control.....	78
Figura. 4. 6. Lazo de control de la planta de temperatura.	78
Figura. 4. 7. Representación de la planta de temperatura.....	79
Figura. 4. 8. Salida PWM a partir del control difuso.	80
Figura. 4. 9. Obtención de la temperatura real.	80
Figura. 4. 10. Curva obtenida de temperatura.	81
Figura. 4. 11. Salida de control del motor.	81
Figura. 4. 12. Bloque de control del nivel bajo.....	82
Figura. 4. 13. Bloque de control del nivel alto.....	82
Figura. 4. 14. Lazo de control de caudal.	83
Figura. 4. 15. Salida de control aplicada al variador de frecuencia.....	83
Figura. 4. 16. Dato de entrada del sensor.	84
Figura. 4. 17. Conversión de voltaje a litros/minutos.	84
Figura. 5. 1. Resultado del control de temperatura para un SetPoin=40, Ti=0,02 y Kp.	86
Figura. 5. 2. Respuesta del control de caudal para el Kp=2,6 y Ti variable.....	88
Figura. 5. 3. Prueba de funcionamiento del control de temperatura.....	88
Figura. 5. 4. Prueba de funcionamiento del control de caudal para un setpoint variable.	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla. 2. 1. Características del Sensor de Caudal.	6
Tabla. 2. 2. Configuración de Ajustes Básicos del Transmisor de Caudal.....	7
Tabla. 2. 3. Características del sensor 873E.....	8
Tabla. 2. 4. Configuración de parámetros del sensor 873E.....	9
Tabla. 2. 5. Características de la electroválvula.	10
Tabla. 2. 6. Características de la bomba de agua POMPETRAVAINI MCM20161.	12
Tabla. 2. 7. Características de la bomba de agua sumergible SUNTERRA 109006.....	13
Tabla. 2. 8. Características de la bomba de agua sumergible SUNTERRA 120016.....	13
Tabla. 2. 9. Especificaciones de rendimiento.	15
Tabla. 2. 10. Configuración De Parámetros.	16
Tabla. 2. 11. Ajuste de la frecuencia.	17
Tabla. 2. 12. Características de la niquelina.....	19
Tabla. 2. 13. Información General.	20
Tabla. 2. 14. Entradas analógica.	21
Tabla. 2. 15. Salidas Analógicas.	21
Tabla. 2. 16. Entrada / Salida Digital.	22
Tabla. 2. 17. Especificaciones Físicas.....	22
Tabla. 3. 1. Características mecánicas – Tanque temperatura.....	42
Tabla. 3. 2. Parámetros según el método de oscilación de Ziegler - Nichols.....	51
Tabla. 3. 3. Base de reglas para el controlador PI difuso.	56
Tabla. 3. 4. Datos de diseño-tubería.....	58
Tabla. 3. 5. Datos obtenidos de caudal en función del voltaje.	63
Tabla. 3. 6. Base de reglas para el controlador PI difuso.	70

Tabla. 4. 1. Características de la computadora usada.....	74
Tabla. 4. 2. Valores obtenidos para la temperatura.	81
Tabla. 5. 1. CIEC del control de temperatura.....	86
Tabla. 5. 2. La tabla muestra resultado del CIEC para un K_p variable y T_i variable.....	87

CAPÍTULO I:

INTRODUCCIÓN

El control inteligente comprende una serie de técnicas – tomadas fundamentalmente de la inteligencia artificial – con las que se pretenden resolver problemas de control inabordables por los métodos clásicos, mediante el uso del software Matlab® como simulador para modelamiento y diseño, debido a su gran capacidad de cálculos y versatilidad de librerías.

Actualmente este software se encuentra utilizado como material didáctico para la enseñanza de los sistemas de control en las Universidades como la ESPE y como herramienta científica de diseño para prototipos.

La lógica difusa puede ser una solución alternativa a la creación de modelos matemáticos de sistemas de control de procesos, permitiendo emular en cierto sentido el pensamiento humano. No sólo existe un gran número de realizaciones concretas de dicho tipo de controlador publicadas en congresos y revistas especializadas, sino que además existe gran demanda e interés de la industria.

Los controladores difusos se describen por reglas Si-Entonces, por lo cual brindan una representación del conocimiento sencilla y comprensible. Se pueden ver como un lenguaje de alto nivel, representado por reglas, que un compilador toma para generar un algoritmo de control. Es una ventaja que estrategias de control complejas, conocidas por operadores o ingenieros en forma de experiencia, puedan ser programadas y mantenidas de una forma sencilla y comprensible.

De aquí que se usó la lógica difusa en un prototipo diseñado y construido como parte de un trabajo anterior de grado que se encuentra en los laboratorios de electrónica para el control de temperatura y caudal por medio de una tarjeta de adquisición de datos y el uso del software Matlab®, Además, se ha diseñado una interfaz para el usuario, usando las herramientas de Matlab® “Simulink”.

Hay que recalcar que a pesar de ya haberse desarrollado sistemas de control difuso sobre plantas existentes en el laboratorio de servo mecanismos el componente principal de los trabajos ha sido el desarrollo de software, por lo que el presente trabajo incluye la implementación del control difuso de temperatura y caudal.

Cuando es de interés estudiar un fenómeno, es necesario hacer una abstracción, para poder concentrarse solo en el fenómeno en cuestión, porque de lo contrario, si se consideraran todas las variables, sería muy difícil y hasta imposible, y muchas veces esas otras variables, no tienen mucha influencia en el fenómeno en cuestión, por lo que es importante el modelo matemático que es: “ un sistema conceptual simplificado que reemplaza a otro sistema real o conceptual más complejo”, es decir, que puede extraerse de un modelo, otro modelo más simple. Por lo tanto se ha obtenido un modelo matemático para la planta de temperatura y para la planta de caudal permitiendo de esta manera simular los controles sin necesidad de usar la planta real, además de que ayuda significativamente en el diseño del control difuso.

Por supuesto, la complejidad del modelo depende de la exactitud con que se quiera estudiar el fenómeno.

Este proyecto de grado abarca el estudio e implementación de un control difuso de temperatura y caudal utilizando las herramientas de Matlab® y la tarjeta de adquisición de datos de National Instruments PCI-6221.

Mediante la tarjeta de adquisición NI PCI-6221 se interconectó la planta real con el sistema Simulink de Matlab®, además se realizó el acondicionamiento de señales obtenidas del proceso de temperatura y caudal para la conexión a la tarjeta.

Por otra parte, para el control de temperatura se implementó una etapa de potencia permitiendo de esta manera un control más preciso, lo cual se consiguió mediante la implementación de un control PI difuso ya que este control elimina el error en estado estable que los otros controles “PD e PID” presentan, además la salida de control es PWM, mientras que para el control de caudal también se usó un control PI difuso ya que la respuesta de la planta es rápida, por lo que se buscó reducir al máximo el error en estado estable propio del control de caudal debido a que se manejan flujos turbulentos.

También se tiene que mencionar que para la sintonización de los controles difusos se aplicó el método de Jan Jantzen, el cual dice que, las variables PID difusas tienen una relación con las variables del control PID clásico. Las variables PID clásicas se hallaron mediante el método de oscilación de Ziegler Nichols, este método es válido sólo para plantas estables a lazo abierto.

CAPÍTULO II:

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Medidor De Flujo

El medidor de flujo SIEMENS SITRANS F M MAG 5100 W es un medidor electromagnético, el principio de funcionamiento de este se basa en la ley de Faraday de inducción electromagnética, la cual enuncia que el voltaje inducido a través de un conductor que se desplaza transversal a un campo magnético es proporcional a la velocidad del conductor.

El medidor de flujo contiene dos bobinas montadas diametralmente en el tubo a medir generando un campo electromagnético pulsado. El líquido que fluye a través de este campo electromagnético induce un voltaje. El transmisor SIEMENS SITRANS F M MAG 6000I evalúa las señales del sensor, luego las convierte en señales estándar apropiadas (4-20 mA) y realiza también la función de una unidad de alimentación que proporciona una corriente constante a las bobinas. El transmisor consta de una serie de bloques de función que convierte el voltaje del sensor en lectura de caudal ^[2].

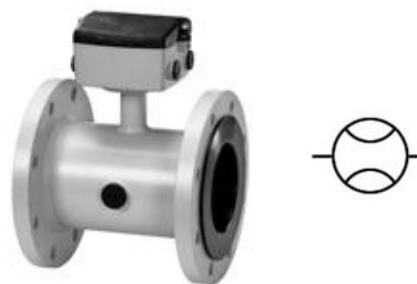


Figura. 2. 1. Sensor Siemens Sitrans F M Mag 5100 W y Símbolo.



Figura. 2. 2. Transmisor Siemens Sitrans F M Mag 6000i y Símbolo.

2.1.1 Principio de funcionamiento

El principio de medición de caudal se basa en la ley de Faraday de la inducción electromagnética como se puede observar en la figura. 2. 3.

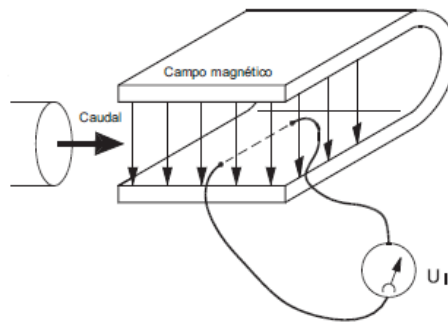


Figura. 2. 3. Inducción electromagnética

Cuando un conductor eléctrico de longitud L se mueve a velocidad v perpendicularmente a las líneas de flujo, a través de un campo magnético de intensidad B , se induce una tensión U_i en los extremos del conductor.

$$U_i = L \times B \times v$$

Donde:

U_i = Tensión inducida

L = Longitud del conductor = Diámetro interior de la tubería = $k1$

$B =$ Intensidad del campo magnético = $k_2 v$

$v =$ Velocidad del conductor (medio)

$k = k_1 \times k_2$

$U_i = k \times v$, la señal del electrodo es directamente proporcional a la velocidad del fluido

2.1.2 Características

Parámetro	Formato/Rango
Voltaje de alimentación	11 – 30 VDC ó 115 – 230 VAC
Consumo de corriente	2.5 – 7 mA
Salida	4 – 20 mA
Máxima carga a la salida	< 800 Ω
Orientación	Vertical/Horizontal
Temperatura ambiental de trabajo	-20 – 60 °C
Error máximo de medición	0.2% (para $v > 0.1$ m/s)
Peso	0.75 kg (2 lb)

Tabla. 2. 1. Características del Sensor de Caudal.

2.1.3 Configuración de parámetros

En la siguiente tabla. 2.2 se indica los parámetros que fueron configurados con sus respectivos valores, para realizar la configuración de estos parámetros es necesario revisar el manual de usuario del Transmisor SIEMENS SITRANS F M MAG 6000I que se hace referencia en el anexo.

Parámetro	Formato/Rango
Frecuencia principal	60 Hz
Dirección de flujo	Positivo
Caudal Máximo (Qmax)	50 l/min
Salida de corriente	on

Tabla. 2. 2. Configuración de Ajustes Básicos del Transmisor de Caudal.

2.2. Sensor de temperatura

El sensor de temperatura de estado sólido Allen Bradley 873E posee una salida PNP y una salida analógica adicional equipada con detección de fallo y funciones detectoras preventivas de fallo en el software y hardware. El rango de funcionamiento de este sensor va desde los -50°C a los 150°C , la salida analógica entrega 4 a 20 mA ^[2].



Figura. 2. 4. Sensor de temperatura Allen Bradley 873E y Símbolo.

2.2.1 Principio de funcionamiento

Normalmente las PT100 industriales se consiguen encapsuladas como es el caso del sensor 873e, es decir dentro de un tubo de acero inoxidable, consiste en un arrollamiento muy fino de platino bobinado entre capas de material aislante. El sensor de temperatura basa su funcionamiento en la variación de resistencia a cambios de temperatura del medio.

El material que forma el conductor (platino), posee un coeficiente de temperatura de resistencia α , el cual determina la variación de la resistencia del conductor por cada grado que cambia su temperatura según la siguiente ecuación.

$$R_t = R_0(1 + \alpha t)$$

Donde:

R_0 = Resistencia en Ω a 0°C

R_t = Resistencia en Ω a $t^\circ\text{C}$

t = Temperatura actual

α = Coeficiente de temperatura de la resistencia cuyo valor entre 0°C y 100°C es de $0.003850 \Omega \times (1/\Omega) \times (1/^\circ\text{C})$

2.2.2 Características

Parámetro	Formato/Rango
Voltaje de alimentación	12 – 30 VDC
Consumo de corriente	Sin carga < 60 mA
Salida	4 – 20 Ma
Máxima carga a la salida	(voltaje de alimentación – 6.5 V) / 0.22 ^a
Orientación	Cualquier orientación
Temperatura ambiental de trabajo	-40 – 85 °C
Temperatura de proceso	-50 - 150°C
Precisión	0.2 °C
Repetibilidad	0.1 °C

Tabla. 2. 3. Características del sensor 873E.

2.2.3 Configuración de parámetros

En la siguiente tabla. 2. 4 se indica los parámetros que fueron configurados con sus respectivos valores, para realizar la configuración de estos parámetros es necesario revisar el manual de usuario del Sensor de Temperatura Allen Bradley 873E que se hace referencia en el anexo.

Función	Parámetro	Valor	Especificaciones
BASE	UNIT	°C	Unidad de medida
	ZERO	10.00	Ajuste a 0°C
	DISP	PV	Muestra la variable seleccionada(temperatura actual)
OUT	FUNC	4—20	Selección de tipo de Salida
	GETL	20.0	Temperatura mínima
	GETU	50.0	Temperatura máxima

Tabla. 2. 4. Configuración de parámetros del sensor 873E.

2.3. Electroválvulas

Las electroválvulas son válvulas electromecánicas, las cuales están diseñadas para controlar la cantidad de flujo de un fluido que circula a través de un conducto o tubería, la posición de la válvula es controlada mediante la corriente que pasa a través de la bobina solenoidal.



Figura. 2. 5. Electroválvula de 1/4 de pulgada y Símbolo.

2.3.1 Principio de funcionamiento

Las electroválvulas suelen ser construidas de dos maneras: la primera consta de un solenoide y un muelle, para que la válvula se abra el solenoide debe estar activado y consumiendo energía para vencer la fuerza del muelle y la segunda es mediante dos solenoides, una para abrir la válvula y el otro para cerrarla.

Las electroválvulas usadas son de un solenoide con retorno por muelle, la salida de agua es 1/4 de pulgada, la entrada de agua es 3/4 de pulgada y es normalmente cerrada.

2.3.2 Características

Parámetro	Formato/Rango
Voltaje de activación solenoide	120 VAC
Tamaño de salida	1/4 de pulgada
Consumo de energía	12 W

Tabla. 2. 5. Características de la electroválvula.

2.4. Bomba de agua

La bomba de agua POMPETRAVAINI MCM20161 es una bomba centrífuga, su principio de funcionamiento se basa en la transformación de la energía mecánica de un impulsor rotatorio llamado rodete en energía cinética y potencial. El fluido entra por el centro del rodete, que dispone de unos álabes para conducir el fluido, y por efecto de la fuerza centrífuga es impulsado hacia el exterior, donde es recogido por la carcasa o cuerpo de la bomba, que por el contorno su forma lo conduce hacia las tubuladuras de salida o hacia el siguiente rodete (siguiente etapa). Una de las principales características de estas bombas es que su flujo es constante y puede alcanzar hasta los 500 m³/h con alturas de hasta 100 m, por esta razón las bombas centrífugas son unas de las más utilizadas en la industria a nivel mundial ^[2].



Figura. 2. 6. Bomba de agua POMPETRAVAINI MCM20161 y Símbolo.

2.4.1 Características bomba de agua

Parámetro	Formato/Rango
Voltaje de alimentación	220/380 VAC
Consumo de corriente	4.9/2.8 A
Funcionamiento	Bomba centrífuga

Tipo de bomba	Agua limpia
Rendimiento	30-110 l/min
Potencia	1.5 hp
Frecuencia de funcionamiento	60 Hz
Salida de agua	Tubo de 3/4"
Entrada de agua	Tubo de 1 1/4"

Tabla. 2. 6. Características de la bomba de agua POMPETRAVAINI MCM20161.

2.5. Bombas De Agua Sumergible

Las bombas de agua SUNTERRA son diseñadas para trabajar de manera sumergida, como todas las bombas sumergibles estas cuentan con un impulsor sellado a la carcasa y un juego de sellos mecánicos que evitan que el agua entre al motor y provoque un cortocircuito. La principal ventaja de este tipo de bombas es que puede proporcionar una mayor fuerza de elevación ya que no dependen de la presión de aire externa para hacer ascender el agua.



Figura. 2. 7. Bomba sumergible de agua y símbolo.

2.5.1 Características

Parámetro	Formato/Rango
Voltaje de alimentación	120 VAC
Potencia	7 Watts
Funcionamiento	Solo para uso sumergido
Tipo de bomba	Agua limpia
Rendimiento	283 l/h
Altura de bombeo	97 cm máximo
Aspiración de agua	Cubierta y parte inferior regulables
Salida de agua	Manguera de 9.5 mm de diámetro

Tabla. 2. 7. Características de la bomba de agua sumergible SUNTERRA 109006.

Parámetro	Formato/Rango
Voltaje de alimentación	120 VAC
Potencia	19 Watts
Funcionamiento	Solo para uso sumergido
Tipo de bomba	Agua limpia
Rendimiento	757 l/h
Altura de bombeo	149 cm máximo
Aspiración de agua	Cubierta y parte inferior regulables
Salida de agua	Manguera de 19.1 mm de diámetro

Tabla. 2. 8. Características de la bomba de agua sumergible SUNTERRA 120016.

2.6. Variador de frecuencia

Un variador de frecuencia es un dispositivo que controla la velocidad rotacional de un motor de corriente alterna, esto se realiza por medio del control de la frecuencia de alimentación del motor. El funcionamiento de este dispositivo se basa en el principio de que la velocidad síncrona de un motor de corriente alterna es determinada mediante la relación entre la frecuencia de corriente suministrada y el número de polos en el estator.



Figura. 2. 8. Variador de frecuencia Starvert iG5.

$$\text{RPM} = \frac{120xf}{p}$$

Donde:

RPM: revoluciones por minuto

f: frecuencia de suministro (Hercio)

p: número de polos del motor

Debido a su tamaño y flexibilidad el variador de frecuencia **iG5 Series** está diseñado para satisfacer las demandas de simplicidad, ahorro de espacio y rentabilidad de fabricantes de equipos originales y usuarios finales, además cumple con estándares internacionales por lo cual puede ser instalado en cualquier lugar del mundo, adicionalmente ofrece características intuitivas como teclado integral con potenciómetro local y teclas de control listas de inmediato para usarse.

2.6.1 Características

Parámetro	Formato/Rango
Control de motores	Voltios/Hercios
Aplicación	Regulación de velocidad de lazo abierto
Capacidades de potencia	0.25...5 hp
Temperatura ambiente	-10 – 40 °C
Capacidad de sobrecarga	150% durante 60 seg. 200% durante 3 seg.
Rango de frecuencia	0...240 Hz
Opciones de comunicación	RS485 integral (Modbus RTU) Opcional: Modbus-RTU(RS485)
Entradas analógicas	Cantidad: 1 (voltaje unipolar)
Salidas analógicas	Ninguno
Entradas digitales	Cantidad: 5 (24 VCC, 2 programables)
Salidas a relé	Cantidad: 1 (formato C)

Tabla. 2. 9. Especificaciones de rendimiento.

2.6.2 Configuración De Parámetros

Los parámetros necesarios para el buen funcionamiento del variador de frecuencia configurados son los siguientes

Modo de arranque	Para el modo de arranque se puede seleccionar por keypad o por los terminales de control.
Frecuencia de salida	Este código da información sobre el motor es una dirección fijada en DRV-13, y la salida de referencia frecuencia. Se puede ajustar la frecuencia de comando con la tecla [FUNC].
Tiempo de aceleración y desaceleración	Mediante la tecla [FUNC] podemos ajustar la aceleración como la desaceleración, el tiempo por defecto es de 10 segundos y se puede variar este dependiendo de las necesidades del control.
Potencia del motor	Se tiene que ingresar el valor de la potencia del motor a la que funciona.

Tabla. 2. 10. Configuración De Parámetros.

En la siguiente figura. 2. 9 podemos observar el tiempo de aceleración y desaceleración que se puede configurar de 1 a 10 segundos indistintamente o dependiendo de la aplicación que se realice para un afrecuencia maxima.

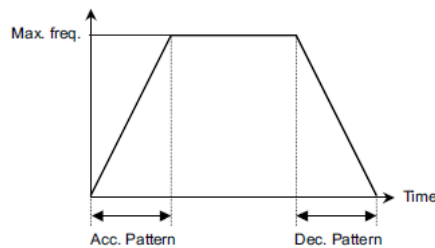


Figura. 2. 9. Tiempo de aceleración y desaceleración.

Método de ajuste de frecuencia

Para el ajuste de la frecuencia existen seis modos en los que se la puede configurar dependiendo el tipo de comunicación que se desee realizar como se muestra en la siguiente tabla. 2. 11.

0	La frecuencia se fija en DRV. Para establecer la frecuencia, pulse [▲], [▼] y pulse [FUNC] para introducir el valor en la memoria. El inversor no genera el cambio de la frecuencia hasta que el botón [FUNC] es presionado.
1	La frecuencia se fija en DRV. Presionar [FUNC] y luego pulsando el botón [▲], [▼], Presionar el botón [FUNC] para guardar el cambiante de la frecuencia.
2	Entrada de la frecuencia de referencia (0-10V) al terminal de control "V1". La cual se fija en DRV.
3	Entrada de la frecuencia de referencia (4 ~ 20mA) al terminal de control "I". La cual se fija en DRV.
4	Entrada de la frecuencia de referencia (0 ~ 10V, 4 ~ 20mA) al terminal de control "V1", "I". La señal 'V1' anula la señal de 'I'.
5	La frecuencia se establece por la serie (Modbus-RTU)

Tabla. 2. 11. Ajuste de la frecuencia.

En la figura. 2. 10 se observa el ajuste de la frecuencia mediante el terminal de control "V1"

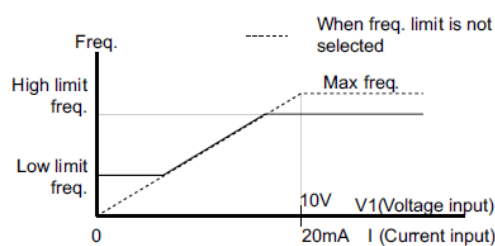


Figura. 2. 10. Ajuste de frecuencia.

2.6.3 Conexión

En la siguiente figura. 2. 11 muestra el diagrama de conexiones de los componentes que intervienen en el proceso de control.

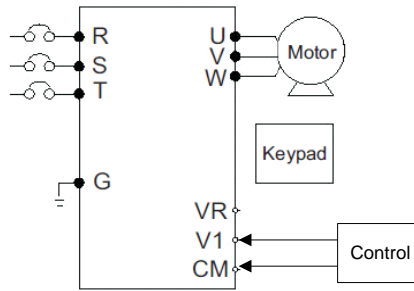


Figura. 2. 11. Conexión del variador de frecuencia.

2.7. Niquelina

La función de la resistencia eléctrica o niquelina es transformar la energía eléctrica en energía térmica como se observa en la ecuación a continuación, esto se debe a que al momento de hacer circular una corriente eléctrica a través de la niquelina, esta encontrará resistencia a su paso, para vencer esta resistencia se realiza un trabajo lo cual produce un consumo de energía, el resultado de este trabajo se traduce en una elevación de temperatura de la niquelina por la cual circula la corriente eléctrica.

$$q_i = R * i(t)^2 = \frac{V(t)^2}{R}$$

Donde:

q_i : Flujo de calor (energía térmica)

R: Resistencia térmica en Ω

i: Corriente consumida o aplicada por la fuente en Amp

V: fuente de alimentación (voltaje de suministro 110v)

Las resistencias eléctricas para duchas son construidas con materiales especiales cuyo punto de fusión es bastante alto, de esta manera pueden ser utilizadas a altas temperaturas por periodos de tiempo largos sin que fundan o rompan. La principal

características de estas resistencias eléctricas es la energía térmica que pueden suministrar por unidad de tiempo, la cual es medida en vatios.



Figura. 2. 12. Resistencia eléctrica o niquelina.

2.7.1 Características

Parámetro	Formato/Rango
Voltaje de alimentación	120 VAC
Potencia	1500 Watts

Tabla. 2. 12. Características de la niquelina.

2.8. Tarjeta de adquisición de datos

La PCI-6221 de National Instruments es una tarjeta de adquisición de datos (DAQ) multifunción de bajo costo de la Serie M optimizada para aplicaciones condicionadas por costos.

Los dispositivos de la Serie M funcionan con diversos sistemas operativos usando tres opciones de software incluyendo NI-DAQmx, sin embargo también es compatible con el software MATLAB® permitiendo de esta manera la fácil manipulación de las entradas y salidas de la tarjeta de adquisición de datos.

2.8.1 Características de la tarjeta PCI – 6221

Información General	
Formato Físico	PCI
Sistema Operativo/Objetivo	Real-Time , Linux , Mac OS , Windows
Tipos de Medida	Voltaje , Codificadores de cuadratura , Digital , Frecuencia
Compatibilidad MATLAB®	con Sí

Tabla. 2. 13. Información General.

Entrada Analógica	
Canales	16
Resolución	16 bits
Velocidad de Muestreo	250 kS/s
Máx. Voltaje de Entrada Analógica	10 V
Rango de Voltaje Máximo	-10 V , 10 V
Precisión Máxima del Rango	3,1 mV

Sensibilidad Máxima del Rango	97.6 μ V
--------------------------------------	--------------

Muestreo Simultáneo	No
----------------------------	----

Memoria Interna	4095 muestras
------------------------	---------------

Tabla. 2. 14. Entradas analógica.

Salida Analógica

Canales	2
----------------	---

Resolución	16 bits
-------------------	---------

Máx. Voltaje de Entrada Analógica	10 V
--	------

Rango de Voltaje	-10 V , 10 V
-------------------------	--------------

Precisión Máxima del Rango	3,23 mV
-----------------------------------	---------

Capacidad de Corriente (Canal/Total)	5 mA
---	------

Tabla. 2. 15. Salidas Analógicas.

E/S Digital

Canales Bidireccionales	24
--------------------------------	----

Máximo Rango de Tiempo	1 MHz
-------------------------------	-------

Capacidad de Corriente Simple	24 mA
Capacidad de Corriente Total	448 mA
Máximo Rango de Entrada	0 V , 5 V
Máximo Rango de Salida	0 V , 5 V

Tabla. 2. 16. Entrada / Salida Digital.

Especificaciones Físicas	
Longitud	15.5 cm
Ancho	9.7 cm
Conector de E/S	VHDCI hembra de 68 pines

Tabla. 2. 17. Especificaciones Físicas.

2.8.2 Conector SCB-68

El SCB-68 es un bloque conector de E/S para realizar interfaz de señales de E/S a dispositivos DAQ insertables con conectores de 68 pines. En combinación con los cables blindados, el SCB-68 brinda terminación de señal robusta con muy poco ruido ^[3]. El SCB-68 es compatible con dispositivos de la Serie M de un solo conector o doble conector con conectores de 68 pines. El bloque conector es también compatible con la mayoría de los dispositivos DAQ de la Serie E, B, S y R, el cual posee las siguientes características:

- 68 pines de montaje vertical, terminales de tornillo para conectar fácilmente a dispositivos DAQ de 68 pines.
- Dimensiones: 14.35 x 10.74 cm (5.65 x 10.74 cm.).
- Monturas metálicas para uso en PC de escritorio o para montaje en un panel personalizado

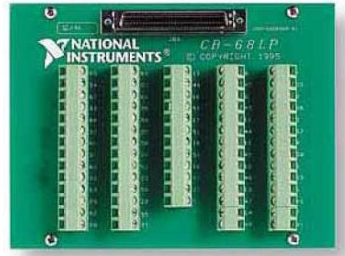


Figura. 2. 13. Conector SCB-68.

2.8.3 Cable NI SHC68-68-EPM

El SHC68-68-EPM de National Instruments está especialmente diseñado para funcionar con dispositivos de la Serie M. Este cable ofrece secciones digitales y analógicas separadas, pares cruzados blindados individualmente para entradas analógicas, salidas analógicas blindadas individualmente y pares cruzados para E/S digitales críticas, el cuál presenta las siguientes características:

- Presenta pares analógicos cruzados blindados individualmente para reducir interferencia con tarjetas de alta velocidad.
- 2 m de longitud.
- Reciclaje de materiales y la utilización de materias primas y procesos de fabricación que no generan perjuicios ambientales.
- Conecta dispositivos de 68 pines de la Serie M directamente a accesorios de 68 pines.



Figura. 2. 14. Cable NI SHC68-68-EPM.

2.8.4 Distribución de Pines de la Tarjeta de Adquisición de Datos NI PCI 6221

A continuación se muestra la Distribución de Pines de la Tarjeta de Adquisición de Datos NI PCI 6221 así como también el tipo de entrada o salida.

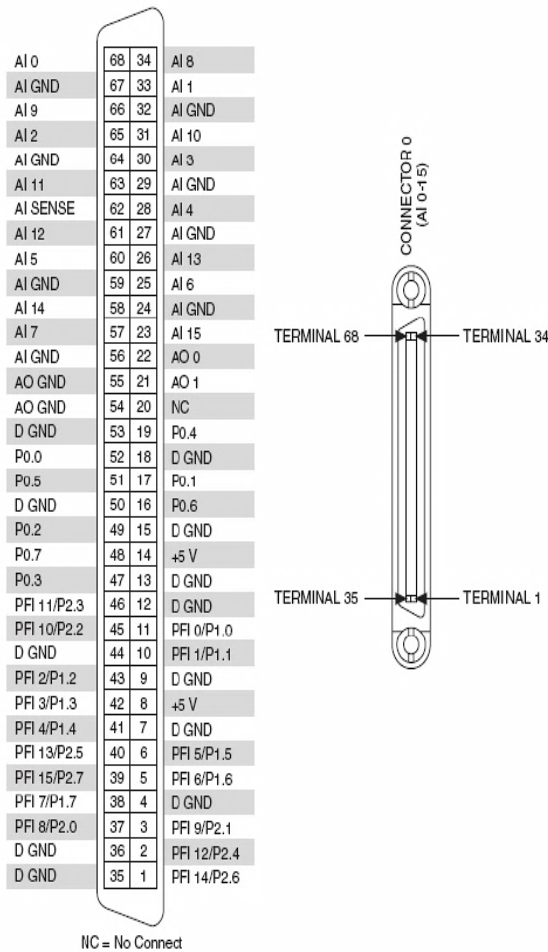


Figura. 2. 15. Distribución de Pines de la Tarjeta de Adquisición de Datos NI PCI 622.

2.9. Lógica Difusa

2.9.1 Introducción

En un artículo escrito en 1961, Lofti A. Zadeh menciona que se necesita una técnica nueva, un tipo especial de matemática, que considere valores lógicos multivaluados, pero hubo que esperar a que en 1965 publicara el primer artículo de lógica difusa.

Lógica difusa (FL) es una lógica multi-valuada que permite (por medio de conjuntos de pertenencia) una forma más práctica de enfocar los problemas como se ven en el mundo real. Al contrario que la información binaria (si/no), la lógica difusa emula la habilidad de razonamiento y hace uso de datos aproximados para encontrar soluciones precisas ^[4].

Se puede configurar un sistema difuso para mapear entradas en salidas, con el mismo propósito que cualquier otro sistema de computación. Básicamente, consiste de 3 etapas: fusificación, evaluación de reglas y defusificación.

Fusificación, es un proceso de traducción para obtener la representación difusa a partir de los valores actuales (por ejemplo, temperatura), para lo cual utiliza las funciones de pertenencia.

Evaluación de reglas o inferencia difusa, es la forma de producir respuestas numéricas difusas a partir de reglas lingüísticas aplicadas a los valores difusos de entrada.

Defusificación, es un proceso de traducción que permite obtener un valor numérico representativo de todas las salidas a partir de la información difusa que produce la evaluación de reglas.

[4] Héctor Nelson Acosta, Diseño De Controladores Dedicados A La Lógica Difusa, Octubre De 2006.

2.9.2 Ventajas De La Lógica Difusa

- No requiere construcciones matemáticas complejas.
- Uso de lenguaje natural
- Facilidad de configuración
- Si bien la inferencia se realiza por medio de lógica difusa, se obtienen resultados precisos
- Fácil adaptación a trabajos en colaboración con otras técnicas

2.9.3 Desventajas De La Lógica Difusa

- Se debe entender y ser capaz de definir el problema
- Se deben evaluar y ajustar los resultados

2.9.4 Sistema Difuso

En general un sistema basado en lógica difusa (FLS) es un mapeo no lineal de datos de entrada en una salida escalar. En este capítulo se muestra cómo interpretar el mapeo no lineal de un FLS geoméricamente, como es hecho comúnmente en la literatura de control difuso, y también como escribir una fórmula detallada para la relación de entrada y salida [4].

Un sistema de control difuso mapea entradas en salidas. Contiene 4 componentes: reglas, fusificador, motor de inferencia y defusificador. Una vez que las reglas han sido establecidas, un FLS puede ser visto como un mapeo que puede ser expresado cuantitativamente como $y=f(x)$.

Las reglas pueden ser provistas por expertos o extraídas de datos numéricos. En todo caso, las reglas son expresadas como una colección de sentencias Si-Entonces.

[4] Héctor Nelson Acosta, Diseño De Controladores Dedicados A La Lógica Difusa, Octubre De 2006.

De las reglas se debe conocer:

1) Variables lingüísticas en contraposición a los valores numéricos de una variable (muy cálido VS 36 grados centígrados). El valor numérico 36°C es interpretado de acuerdo a funciones de pertenencia asociadas a cada variable lingüística, y su semántica permite representar con un valor difuso cuanto pertenece el valor numérico a cada variable lingüística.

2) La cuantificación de variables lingüísticas que es realizada usando funciones de pertenencia (la variable u_1 debe tomar un valor de pertenencia al término lingüístico asociado, en el rango muy cálido a muy frío). Si la variable temperatura tiene las variables lingüísticas: muy cálido, cálido, frío y muy frío; el valor 36° puede tomar los valores muy cálido=1, cálido=0.3, frío=0 y muy frío=0.

3) Los conectores lógicos para variables lingüísticas (and, or,...).

4) Las implicaciones (Si a Entonces b).

5) Como combinar un conjunto de reglas.

El fusificador mapea valores numéricos en conjuntos difusos. Es necesario para activar reglas, que están en términos de variables lingüísticas y tienen asociados conjuntos difusos. Si la variable temperatura toma el valor 36°C, al fusificar el valor se obtiene la pertenencia a todos los conjuntos difusos, de tal forma que puede ser válido que muy cálido=1, cálido=0.3, frío=0 y muy frío=0.

El motor de inferencia de un FLS mapea conjuntos difusos en conjuntos difusos.

Maneja la forma en la cual las reglas son combinadas. Como los humanos usan distintos tipos de procesos de inferencia, para entender cosas o tomar decisiones, un FLS puede usar distintos procedimientos de inferencia difusa. Solo se usan unos pocos procedimientos en aplicaciones FL.

El defusificador mapea conjuntos de salida difusos en números. En aplicaciones de control, tales números corresponden a la acción de control a tomar.

2.9.5 Conjuntos Difusos

Un conjunto difuso F definido sobre un universo de discurso U es caracterizado por una función de pertenencia $\mu_F(x)$, que toma valores en el intervalo $[0,1]$. Un conjunto difuso es una generalización de un conjunto ordinario (cuyas funciones de pertenencia toman valores 0 ó 1). Una función de pertenencia brinda una medición del grado de similitud de un elemento en U al subconjunto difuso. En FL un elemento puede residir en más de un conjunto con diferentes grados de similitud ^[4].

Por ejemplo si se analizan líquidos potables, se puede considerar que el agua mineral pertenece el 100% a dicho conjunto, la cerveza el 95%, mientras que el ácido sulfúrico el 0%. Así, la pertenencia a un conjunto puede interpretarse como que el agua mineral es similar a un líquido potable el 100%, la cerveza el 95% y el ácido el 0%.

Un conjunto difuso F en U puede representarse como un conjunto de pares ordenados de la siguiente forma:

$$F = \{ (x, \mu_F(x)), x \in U \}$$

Donde:

F = Conjunto difuso

[4] Héctor Nelson Acosta, Diseño De Controladores Dedicados A La Lógica Difusa, Octubre De 2006.

U = Universo de discurso

$\mu_F(x)$ = Función de pertenencia

x = Variable asociada (temperatura, caudal,...)

En FL, las operaciones de unión, intersección y complemento se definen en términos de sus funciones de pertenencia. Si los conjuntos difusos A y B son descritos por sus funciones de pertenencia $\mu_A(x)$ y $\mu_B(x)$, la definición de la unión difusa es la siguiente función de pertenencia:

$$A \cup B \Rightarrow \mu_A(x) \cup \mu_B(x)$$

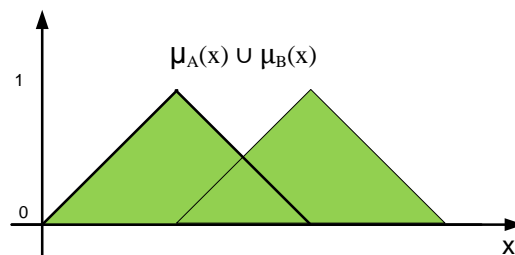


Figura. 2. 16. Unión difusa.

y la definición de la intersección difusa:

$$A \cap B \Rightarrow \mu_A(x) \cap \mu_B(x)$$

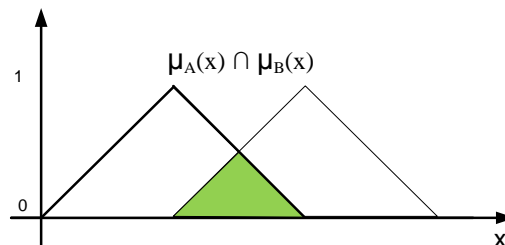


Figura. 2. 17. Intersección difusa.

Adicionalmente, la función de pertenencia para el complemento difuso es:

$$\neg A \Rightarrow \neg \mu_A(x) = 1 - \mu_A(x).$$

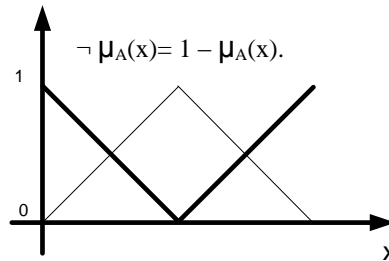


Figura. 2. 18. Complemento difuso.

Obviamente, las tres definiciones están inspiradas en sus correspondientes funciones de pertenencia. Aunque ambas funciones de pertenencia se vean iguales, debemos recordar que:

Los conjuntos difusos pueden ser caracterizados sólo por sus funciones de pertenencia.

2.9.6 Variables Lingüísticas

Si u denota el nombre de una variable lingüística (ej. temperatura), los valores numéricos de la variable lingüística u son denominados x , donde $x \in U$. Algunas veces x y u son usados indistintamente, especialmente cuando una variable lingüística es una letra conocida en ingeniería [4].

Por ejemplo, el dominio de la variable lingüística temperatura (en el rango de 0 a 100 grados centígrados) puede ser representado por un conjunto de cuatro términos: muy cálido, cálido, frío y muy frío. Cada uno de los términos será evaluado por medio de una

función de pertenencia, obteniéndose para cada valor de temperatura la similitud (o pertenencia) a cada una de las variables (muy cálido, cálido, frío y muy frío).

2.9.7 Funciones De Pertenencia

En aplicaciones FL de ingeniería, las funciones de pertenencia $\mu_F(x)$ son asociadas con términos que aparecen en antecedentes o consecuentes de reglas, o en frases. Así las funciones de pertenencia definen el comportamiento de cada término ^[4].

Las formas de funciones de pertenencia más comúnmente usadas son: triangular, trapezoidal, lineal por segmentos y Gaussiana. Basado en su experiencia, el usuario puede seleccionar arbitrariamente dichas formas, así pueden tomar distintos valores.

Se obtiene mayor resolución al representar el dominio con mayor cantidad de funciones de pertenencia; el inconveniente es que se produce un incremento en la cantidad de reglas, lo que implica un aumento de la complejidad de cálculo.

Una de las ventajas de FL es que las funciones de pertenencia pueden ser diseñadas para solaparse, de tal forma que pueda expresarse que una botella puede estar parcialmente llena o parcialmente vacía al mismo tiempo. Así, es posible distribuir nuestra decisión sobre más de una clase de entrada, lo cual ayuda a hacer FLS robustos.

2.9.8 Sistemas De Lógica Difusa

Los cuatro elementos que permiten escribir una fórmula matemática que relaciona la salida de un FLS con sus entradas son:

[4] Héctor Nelson Acosta, Diseño De Controladores Dedicados A La Lógica Difusa, Octubre De 2006.

Las **reglas** definen el comportamiento del controlador:

El **fusificador** es el módulo responsable de la traducción a valores difusos de los valores de las variables de entrada.

El **motor de inferencia** se encarga de realizar el cálculo o aplicación de todas las reglas.

El **defusificador** es el encargado de la traducción del valor difuso de salida, que genera el motor de inferencia, a su valor de salida.

2.9.9 Reglas

Una base de reglas consiste en una colección de reglas Si- Entonces, la cual puede ser expresada como:

$R^{(L)}$: Si u_1 es F_1 Y u_2 es F_2 Y... Y u_p es F_p Entonces v es G

Donde: $L = 1, 2, \dots, m$, F_p y G son conjuntos difusos en $U_i \subset R$ y $V \subset R$, respectivamente (R denota el conjunto de números reales), u_i representa a cada variable de entrada del sistema (u_1, \dots, u_p) $\in U_1 \dots, U_p$, y $v \in V$ y representa una variable de salida del sistema. Sus valores numéricos son $x \in U$ e $y \in V$, respectivamente. Una regla puede tomar en consideración uno o múltiples antecedentes para determinar un consecuente.

Las reglas difusas son generadas a partir de los datos realizando los siguientes tres pasos:

- 1) Determinar el grado (valores de funciones de pertenencia) de los elementos.

2) Asignar cada variable a la región con máximo grado.

3) Obtener una regla de un par de datos de entrada/salida deseado.

Como puede haber gran cantidad de datos, puede ser que haya reglas un poco conflictivas (ej. reglas con los mismos antecedentes, pero diferentes consecuentes). Esto se resuelve asignando un grado de certeza, a cada regla y aceptando sólo la regla que tenga mayor grado de un grupo en conflicto.

2.9.10 Fusificador

Es el módulo responsable de la traducción a valores difusos los valores de las variables de entrada.

El fusificador mapea valores: $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \in U$ en un conjunto difuso A .

Donde: U es el universo de discurso.

2.9.11 Motor De Inferencia Difusa

Los principios de FL se usan para combinar reglas difusas Si- Entonces, de la base de reglas, en un mapeo de conjuntos de entrada difusos $U = U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n$ en conjuntos difusos de salida en V . Cada regla es interpretada como una implicación difusa^[4]. Con referencia a la ecuación,

$R^{(L)}$: Si u_1 es F_1 Y u_2 es F_2 Y... Y u_p es F_p Entonces v es G

[4] Héctor Nelson Acosta, Diseño De Controladores Dedicados A La Lógica Difusa, Octubre De 2006.

El motor de inferencias, como sistema, es un bloque que mapea conjuntos de entrada difusos en conjuntos difusos de salida: $U_F(x) \rightarrow B(x,y)$ La Figura. 2. 19 muestra el diagrama, donde la entrada es un vector permitiendo que las reglas tengan (potencialmente) múltiples antecedentes.

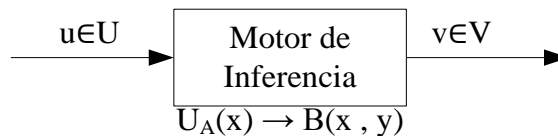


Figura. 2. 19. Diagrama del motor de inferencia.

2.9.12 Defusificador

Para desarrollar aplicaciones de FL, el criterio más difundido para la selección del defusificador es la simplicidad computacional. De acuerdo con este criterio, se muestra el defusificador más utilizado ^[4].

Centroide:

Este defusificador es una simplificación realizada sobre el cálculo del Centro de Gravedad, se establece un punto aproximado denominado centroide y de B, y usa ese valor como salida del FLS.

$$y^* = \frac{\sum y_i * \mu_B(y_i)}{\sum \mu_B(y_i)}$$

con $i = 1, \dots, I$. Este método es la forma más ampliamente usada de defusificación.

[4] Héctor Nelson Acosta, Diseño De Controladores Dedicados A La Lógica Difusa, Octubre De 2006.

Ejemplo:

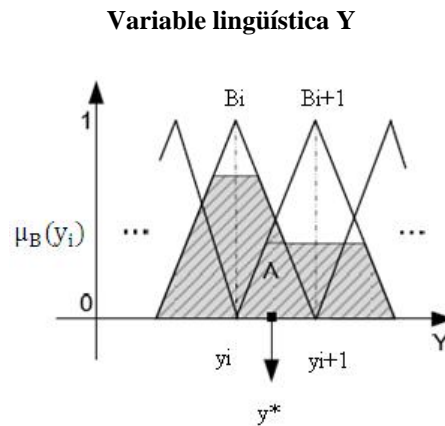


Figura. 2. 20. Conjunto difuso resultante de un proceso de inferencia.

Donde:

y^* = dato real de la defusificación

y_i = Posición en la que se encuentra la variable (nivel, caudal, ...) con $B_i=1$

y_{i+1} = Posición en la que se encuentra la variable (nivel, caudal, ...) con $B_{i+1}=1$

B_i = Conjunto difuso de salida.

$\mu_B(y_i)$ = grado de pertenencia

$$y^* = \frac{\sum y_i * \mu_B(y_i)}{\sum \mu_B(y_i)}$$

$$y^* = \frac{(10) * \mu_B(10) + (20) * \mu_B(20)}{\mu_B(10) + \mu_B(20)}$$

$$y^* = \frac{(10) * 0.6 + (20) * 0.2}{0.6 + 0.2}$$

$$y^* = 12.5$$

2.9.13 Modelos Difusos

A principio de los setenta, el modelado difuso fue tratado como un importante problema de la teoría de sistemas difusos. La identificación de un modelo difuso, directamente de los datos de entrada y salida o de la investigación del comportamiento del operador del proceso, es requerida para aplicaciones prácticas de control difuso. Los modelos ayudan a ver el comportamiento y la estructura básica de procesos complejos [4].

Hay una variedad de modelos difusos de acuerdo a la forma de las reglas Si-Entonces involucradas en los modelos difusos, pero pueden ser clasificados en dos principales modelos: el propuesto por Mamdani en y el propuesto por Takagi-Sugeno.

2.9.14 Modelo difuso de ‘Mamdani’

La configuración del modelo difuso de Mamdani se muestra en la Figura. 2. 21. En esta clase de modelos difusos, las reglas difusas Si- Entonces son de la forma:

R_i : Si x_1 es A_1 and x_2 es A_2 and....and x_n es A_n Entonces y es B_n

Donde:

$n=1, 2, \dots, i$

x_n = posición en la que se encuentra la variable (nivel, caudal, ...)

A_n, B_n = Conjuntos difusos

R_i = Regla aplicada.

y =Resultado de la regla.

Es también una característica que la materialización del motor de inferencias difusas, fusificador y defusificador se beneficia de la libertad de elección del tipo de operaciones.

Las principales ventajas del modelo difuso de Mamdani se especifican a continuación. Primero, su simplicidad en la representación de las reglas difusas, tanto las antecedentes como los consecuentes tienen forma de conjunto difuso lo que facilita su interpretación. Segundo, su flexibilidad en la materialización debido a la posibilidad de seleccionar las operaciones del motor de inferencia, del fusificador o defusificador ^[4].

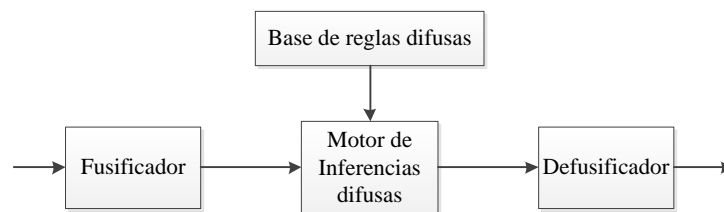


Figura. 2. 21. Configuración del Modelo de Mamdani.

La principal desventaja de este modelo difuso es que para sistemas complejos no lineales usualmente se requieren muchas reglas difusas Si- Entonces, lo cual hace más compleja su materialización.

Ejemplo en la figura. 2. 22 se muestra la configuración básica de un sistema tipo Mamdani

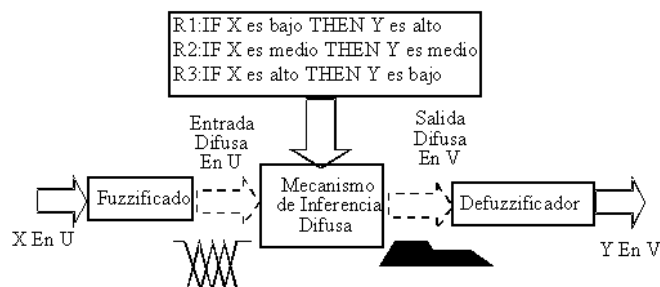


Figura. 2. 22. Sistema Difuso Mamdani, Procesamiento General.

En la siguiente figura. 2. 23 se muestra de manera más detallada como es el funcionamiento de un sistema difuso Mamdani

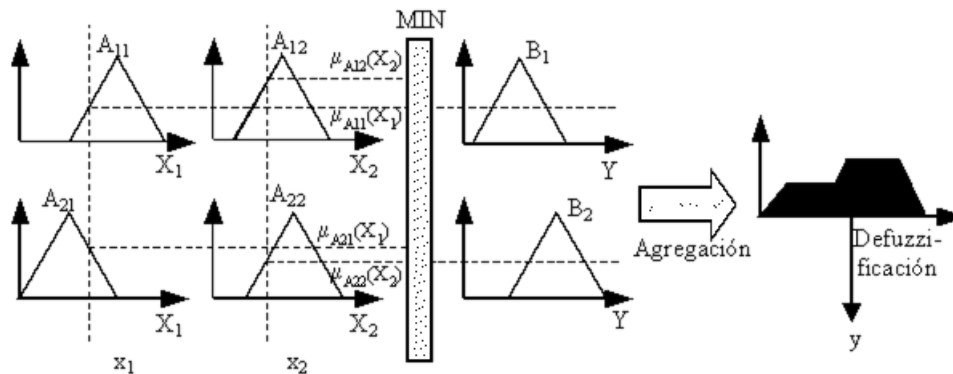


Figura. 2. 23. Sistema Difuso Mamdani, Procesamiento Detallado.

2.9.15 Modelo difuso de 'Takagi-Sugeno'

La configuración del modelo difuso de Takagi-Sugeno se muestra en la Figura. 2. 26. En esta clase de modelos difusos, las reglas difusas Si- Entonces son de la forma:

Si x_1 es A **and** x_2 es B **Entonces** $z = f(x)$

Donde, x e y son las entradas de referencia para el control como puede ser el error, cambio de error entre otras, A y B son conjuntos difusos; $z = f(x, y)$, es la salida de las reglas Si- Entonces difusas.

Es un proceso de traducción que permite obtener un valor numérico representativo de todas las salidas a partir de la información difusa que produce la evaluación de reglas. Una vez que las reglas han sido establecidas, un FLS puede ser visto como un mapeo que

puede ser expresado cuantitativamente como $z = f(x)$. Para defusificar el valor difuso obtenido de la inferencia, se debe calcular:

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n w_i * z_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

Donde Z =salida final del sistema, Para el nivel de salida de cada regla z_i se pondera por w_i (fuerza de disparo). Por ejemplo, para una regla **and** de entrada $x=A$ e $y=B$, la fuerza de disparo es

$$w_i = \mathbf{Min} (\mu_A(x), \mu_B(x))$$

Donde:

$\mu_A(x)$, $\mu_B(x)$ son funciones de pertenencia.

La siguiente Figura. 2. 24 muestra la forma en la que se aplican las reglas para obtener w e z del modelo difuso tipo Takagi-Sugeno.

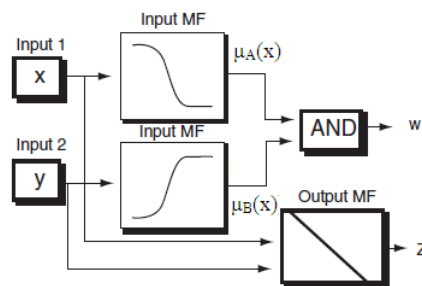


Figura. 2. 24. Regla difusa.

La siguiente Figura. 2. 25 se muestra de manera más detallada como es el funcionamiento de un sistema difuso Sugeno.

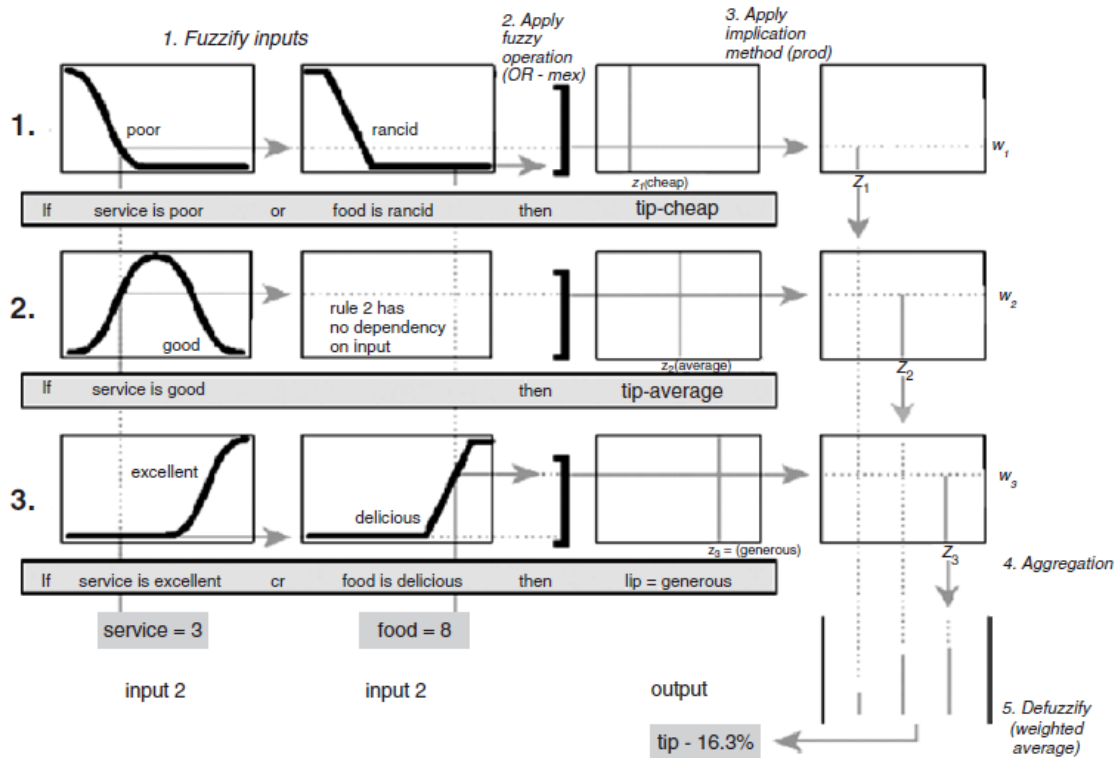


Figura. 2. 25. Sistema Difuso Sugeno, Procesamiento Detallado.

La principal ventaja de este modelo difuso es su poderosa capacidad de representar relaciones complejas y no lineales en un conjunto con un pequeño número de reglas difusas Si- Entonces. En suma, los consecuentes en el modelo de Mamdani, con reglas difusas Si- Entonces, son remplazados por consecuentes en forma de relaciones lineales de Takagi-Sugeno [4].

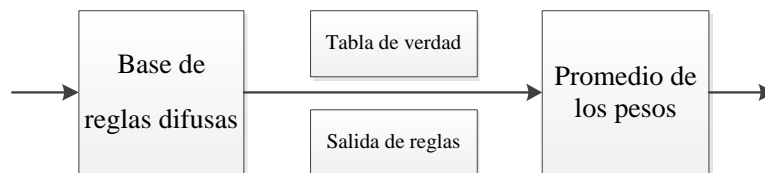


Figura. 2. 26. Configuración del modelo difuso de Takagi-Sugeno.

[4] Héctor Nelson Acosta, Diseño De Controladores Dedicados A La Lógica Difusa, Octubre De 2006.

CAPÍTULO III

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR DIFUSO

En la actualidad se utilizan los modelos matemáticos en la mayoría de los campos de la ingeniería; Los fenómenos físicos vienen definidos por ecuaciones diferenciales no lineales cuya resolución resulta imposible a no ser que se limiten a geometrías más simples. Los modelos matemáticos se aplican al estudio de diversos problemas físicos, entre los que podemos incluir: Estudio de flujos (líquidos o gaseosos), estudio de campos eléctricos y magnéticos, entre otros, por lo que, desde hace bastante tiempo estos métodos se utilizan para el diseño y comprobación de muchos dispositivos que nos rodean. Uno de los campos que adoptaron este método de análisis es el sector de automatización industrial y aeronáutica.

Recalcando el modelo matemático es muy importante para el estudio de un fenómeno físico, por lo que, en este capítulo se desarrolla el modelamiento matemático de la planta de caudal y temperatura, para el desarrollo de los controladores difusos, posiblemente uno de los beneficios más importantes es que permite el trabajo en un entorno seguro y el desarrollar controladores más precisos sin necesidad de utilizar la planta real, esto representa una gran ayuda cuando se trata de una industria, debido a que no se debe parar la producción para el desarrollo de un nuevo control.

3.1. Modelamiento del sistema de Temperatura

La estructura principal del tanque de temperatura se indica en la Figura. 3.1.

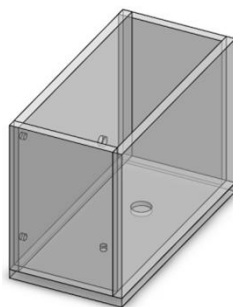


Figura. 3. 1. Tanque de temperatura.

La Tabla. 3. 1 muestra las consideraciones de diseño que se utilizaron para la construcción del tanque de temperatura.

Material	Acrílico 12 mm
Presión	$Ph = 1960 Pa$
Volumen	$V = 0.009 m^3$
Temperatura Máxima Aplicable	98 ° C
Resistencia mecánica	$0.01 - 0.02 \frac{kg \cdot m}{cm}$
Corrosión	Muy buena resistencia

Tabla. 3. 1. Características mecánicas – Tanque temperatura.

El tanque en el cual se va a realizar el control de temperatura posee un volumen interno de 7 litros aproximadamente, de los cuales se usarán 5 litros como seguridad para evitar el desbordamiento del agua.

Como característica del control se impuso alcanzar una temperatura máxima de 50 °C en un tiempo de 5 minutos, la temperatura inicial del proceso será la temperatura ambiente del agua que es de 20 °C.

Para calentar 5 litros de agua es necesario calcular la potencia requerida mediante la siguiente ecuación de energía.

$$E = m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

Donde:

m: masa(kg)

Cp: Calor específico del agua ($\frac{J}{Kg^{\circ}C}$)

ΔT : Variación de temperatura ($^{\circ}C$)

E: Energía (J)

P: Potencia (w)

t: Tiempo (seg)

$$\Delta T = 50 - 20 = 30 \text{ }^{\circ}C$$

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$m = \rho \cdot V$$

$$m = 1000 \frac{Kg}{m^3} \cdot 0.004m^3$$

$$m = 4kg$$

$$C_p = 4186 \frac{J}{Kg^{\circ}C}$$

$$E = m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

$$E = 4Kg \cdot 4184 \frac{J}{Kg^{\circ}C} \cdot 30 \text{ }^{\circ}C$$

$$E = 502080J$$

$$P = \frac{E}{t}$$

$$P = \frac{502080\text{J}}{300\text{s}} = 1620\text{w} \approx 1500\text{w}$$

Para la activación de la niquelina se usó un relé de estado sólido, la corriente que debe soportar el relé de estado sólido se calcula de acuerdo al voltaje y la potencia de la niquelina de la siguiente manera:

La niquelina que se utilizará consume una potencia aproximada de 1000 Watts. Debido a que la niquelina es una carga resistiva el factor de potencia ($\text{Cos } \phi$) es 1, por lo tanto la potencia activa consumida es de 1000 Watts.

$$I = \frac{P}{V \times \text{Cos } \phi}$$

Remplazando,

$$I = \frac{1000 \text{ W}}{118 \text{ V} \times 1}$$

$$I = 8,47 \text{ A}$$

3.1.1 Modelo del sistema de temperatura

El modelo matemático del sistema está basado en la ecuación de balance de energía como se muestra a continuación.

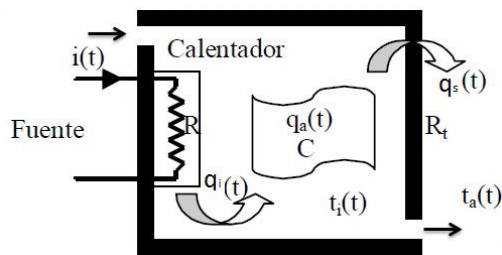


Figura. 3. 2. Proceso térmico.

Energía de entrada = Energía que sale + Energía que se acumula.

$$q_i = q_s + q_a$$

$$q_i = R * i(t)^2 = \frac{V(t)^2}{R}$$

$$q_a = C \frac{dt_i(t)}{dt}$$

$$q_s = \frac{(t_i(t) - t_a(t))}{R_t}$$

Donde:

q_i : Flujo de calor de entrada

q_a : Flujo de calor acumulado

q_s : Flujo de calor de salida

R : resistencia térmica

C : Capacitancia térmica

R_t : Resistencia térmica del recipiente

A partir de las ecuaciones obtenidas anteriormente basadas en el balance de energía se ha derivado el siguiente diagrama de bloques que representa el modelo matemático del sistema de temperatura el cual es realizado en Matlab para la simulación del mismo, como se

puede ver en el siguiente modelo, siendo necesario en muchos casos definir los valores iniciales de algunas variables del sistema (se especifican en los bloques de integración).

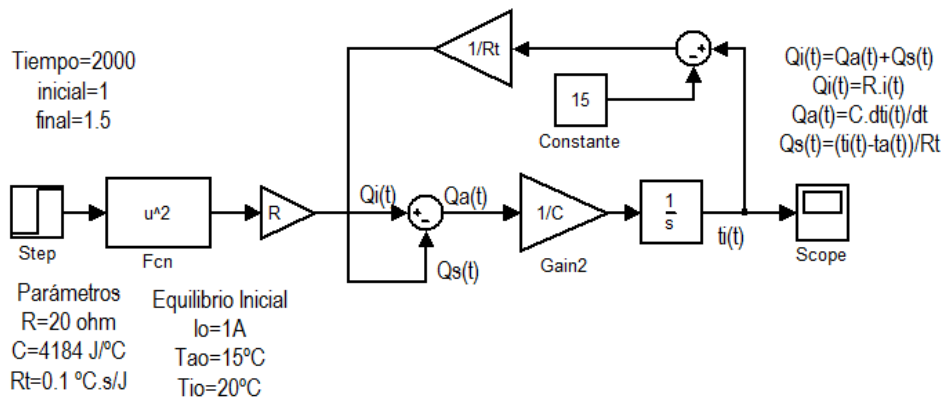


Figura. 3. 3. Modelo no lineal.

El modelo lineal respecto a un punto de funcionamiento se obtiene mediante transformada de Laplace como se muestra a continuación:

$$Q_i(t) = Q_a(t) + Q_s(t)$$

$$Q_i(t) = R \cdot i^2(t)$$

$$Q_a(t) = C \cdot dt_i(t)/dt$$

$$Q_s(t) = (t_i(t) - t_a(t))/Rt$$

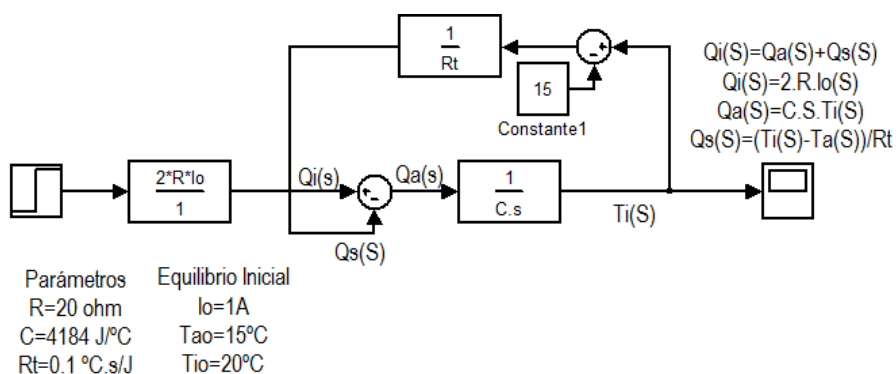


Figura. 3. 4. Modelo lineal.

Al comprobar la simulación de ambos modelos, se puede observar el error que introduce la linealización del modelo matemático.

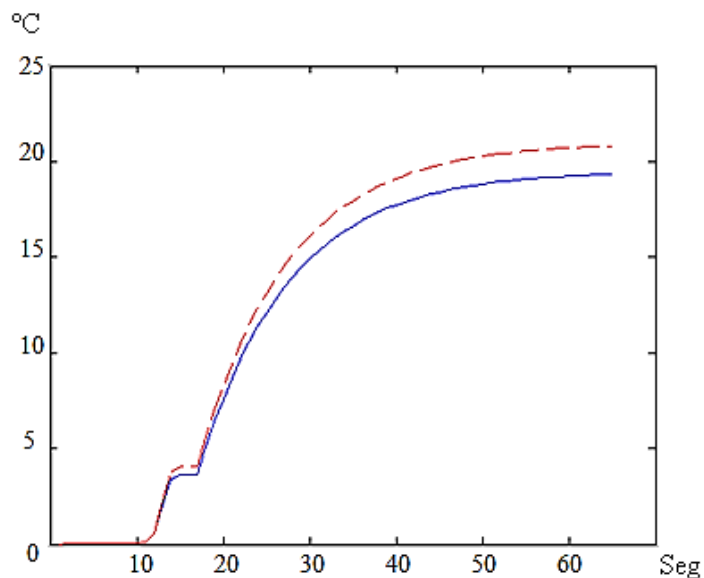


Figura. 3. 5. Respuesta del modelo matemático lineal y no lineal en el tiempo.

Donde la curva recortada es la respuesta obtenida del modelo lineal respecto a un punto de funcionamiento mediante transformadas de Laplace y la curva continua representa la respuesta en el tiempo de modelo matemático a partir de las ecuaciones basadas en el balance de energía

3.2. Diseño del control de Temperatura

Para un mejor conocimiento del control a realizar, se ilustra en la Figura. 3.6. el diagrama de instrumentación, como se observa la parte encerrada en un círculo es la instrumentación utilizada en el control de temperatura.

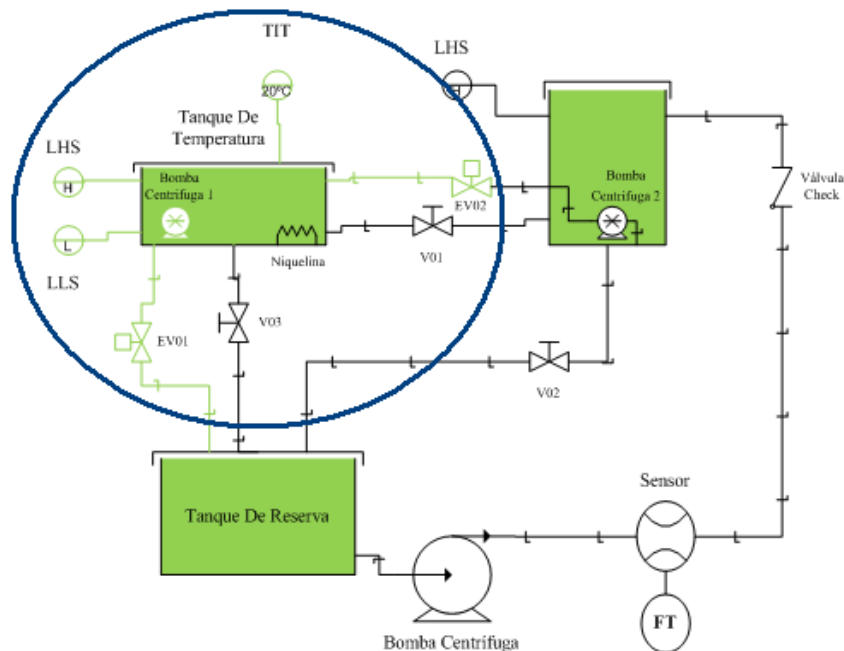


Figura. 3. 6. Diagrama de instrumentación

3.2.1 Especificaciones del Problema

Como especificación del sistema de control, la temperatura máxima de 50 °C se alcanzará en un tiempo de 5 minutos, mientras que la temperatura inicial del proceso será la temperatura ambiente del agua que es de 20 °C.

3.2.2 Solución del Problema

Para la solución del problema se utilizará la configuración del modelo difuso de Takagi-Sugeno que se muestra en la Figura,

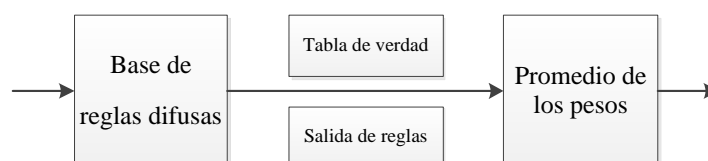


Figura. 3. 7. Configuración del modelo difuso de Takagi-Sugeno.

La principal ventaja de este modelo difuso es su poderosa capacidad de representar relaciones complejas y no lineales en un conjunto con un pequeño número de reglas difusas Si- Entonces. En esta clase de modelos difusos, las reglas difusas Si- Entonces son de la forma:

Si (x es A) **Y** (y es B) **Entonces** $z = f(x, y)$,

Donde, x e y son las entradas de referencia para el control como puede ser el error, cambio de error entre otras, A y B son conjuntos difusos; $z = f(x, y)$, es la salida de las reglas Si- Entonces difusas.

3.2.3 Sintonización del controlador Pi difuso

El sistema sobre el cual se basará el diseño del controlador difuso, consta del bloque correspondiente al controlador, el bloque de la planta, el bloque del sensor (realimentación entre la salida y el sumador a la entrada) y la referencia o entrada del sistema.

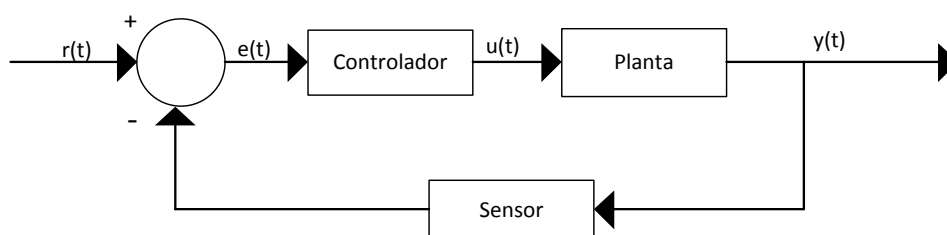


Figura. 3. 8. Representación del diagrama de bloques del sistema.

A partir de los parámetros del PID convencional se dispuso a sintonizar un controlador Pi difuso con las siguientes entradas:

$$e(t) = r(t) - y(t) \text{ y } \int e(t)$$

Para hallar los valores de K_p , T_i y T_d se utilizara el Método de oscilación de Ziegler-Nichols, este método es válido sólo para plantas estables a lazo abierto como se muestra en la siguiente figura [7].

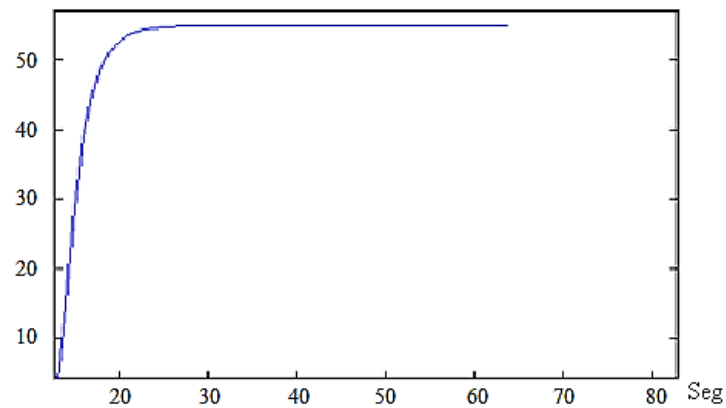


Figura. 3. 9. Respuesta estable a lazo abierto.

Los parámetros PID convencionales se obtienen de la siguiente forma:

1. Aplicar a la planta sólo control proporcional con ganancia K_p pequeña.
2. Aumentar el valor de K_p hasta que el lazo comience a oscilar.
3. Registrar la ganancia crítica $K_p = K_c$ y el período de oscilación P_c de $u(t)$, a la salida del controlador.
4. Ajustar los parámetros del controlador PID de acuerdo a la tabla.

	K_p	T_i	T_d
PI	$0,45K_c$	$P_c/1,2$	-
PID	$0,6K_c$	$P_c/2$	$P_c/8$

Tabla. 3. 2. Parámetros según el método de oscilación de Ziegler - Nichols.

Para hallar la ganancia crítica, este método se aplica en un proceso a lazo cerrado, como el que se muestra en la Figura, el sistema a lazo cerrado tiene una ganancia crítica (K_c), la cual corresponde con el límite de estabilidad del sistema a lazo cerrado.

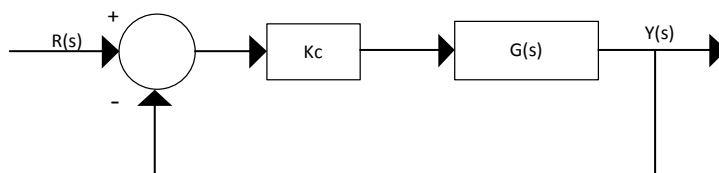


Figura. 3. 10. Esquema de Control.

En la siguiente figura se muestra la respuesta en el tiempo del modelo matemático de temperatura respecto a una entrada, para $K_p=2.5$, se puede notar que el sistema presenta una respuesta que oscile continuamente como se muestra en la figura por lo que la $K_c=2.5$ (k crítica).

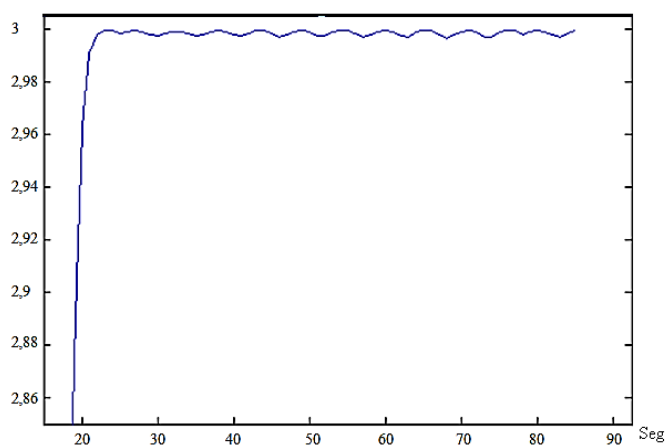


Figura. 3. 11. Respuesta de la planta para un control proporcional en lazo cerrado.

Para un $k_c=2,5$ se tiene un período de oscilación $P_c=16$ seg como se puede observar en la figura. 3. 11 aplicando las formulas del Método de oscilación de Ziegler-Nichols obtenemos:

$$K_p = 0,45k$$

$$K_p = 0,9$$

$$T_i = p_c/1,2$$

$$T_i = 14$$

Las ganancias G_E , G_{CE} y G_U para la sintonía de un controlador PD difuso a partir de los parámetros del PI convencional, propuesto por Jan Jantzen ^[5] son:

$$K_p = G_E * G_U$$

$$T_d = \frac{G_{CE}}{G_E}$$

$$\frac{1}{T_i} = \frac{G_{IE}}{G_E}$$

Dado que el universo normalizado de discurso del error está determinado en el rango de [-50 50], el primer ajuste se considera que $G_E=0.5$ de esta manera las constantes del controlador difuso quedan como:

$$G_E = 0.5$$

$$G_U = \frac{1.2}{0.5} = 2.4$$

$$G_{IE} = \frac{0,5}{14} = 0,03$$

De esta manera el lazo de control resultante se representaría como se muestra en la figura. 3. 12.

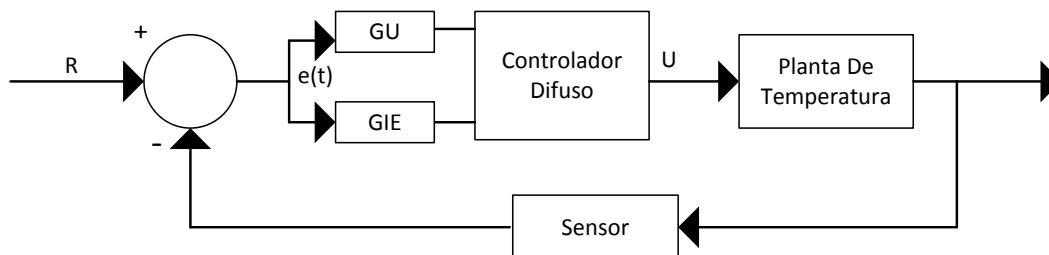


Figura. 3. 12. Lazo de control para la planta de temperatura.

Designación de las entradas y salida del controlador difuso en al ventana de FIS de Matlab.

Temperatura de entrada (T): es la temperatura aplicada al sistema. Su valor va desde 0 a 50 °C que corresponden a la temperatura mínima y máxima que se pueden obtener en el sistema debido a que se trata de un modulo didáctico para estudiantes.

En la ventana FIS de Matlab la primera entrada del controlador viene a ser el error (e) que se obtiene mediante la resta del valor de entrada y el valor del sensor. Su valor va desde -50 °C a 50 °C que corresponden ha la temperatura máximo y mínimo del error, de la misma forma declaramos la segunda entrada que corresponde a la integral del error.

Voltaje de salida (u): Este voltaje de salida corresponde al voltaje entregado por el controlador que será llevado a la entrada de la planta, siendo así la acción de control que se aplica a la planta ^[6].

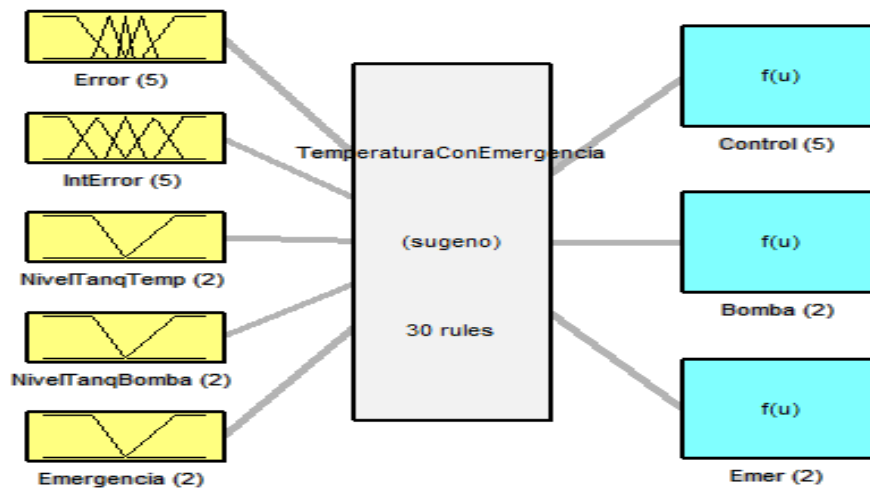


Figura. 3. 13. Designación de las entradas y salida del controlador difuso.

Fusificación

Se utilizaron dos universos de discurso cada uno con cinco funciones de pertenencia. Las funciones de pertenencia usadas fueron trapezoidales y triangulares, porque se adaptaron mejor al dominio discreto que proporciona el control difuso. Estas fueron afinadas mediante ejercicios de prueba y error.

Variables lingüísticas

La cuantificación de variables lingüísticas se obtuvieron usando las funciones de pertenencia (la variable temperatura debe tomar un valor de pertenencia al término lingüístico asociado, en el rango muy cálido a muy frío). Si la variable temperatura tiene las variables lingüísticas: muy cálido, cálido, sin cambios, frío y muy frío; el valor 36° puede tomar los valores muy cálido=0.7, cálido=1, sin cambios =0.3, frío=0 y muy frío=0.

Donde :

- Mn: Muy frío
- n: frío
- c: sin cambios
- p: cálido
- Mp: Muy cálido

Tanto para el error (e) y para la integral del error (IntError) se realiza la representación de las funciones de pertenencia como se puede ver en la figura. 3. 14 y figura. 3. 15 respectivamente.

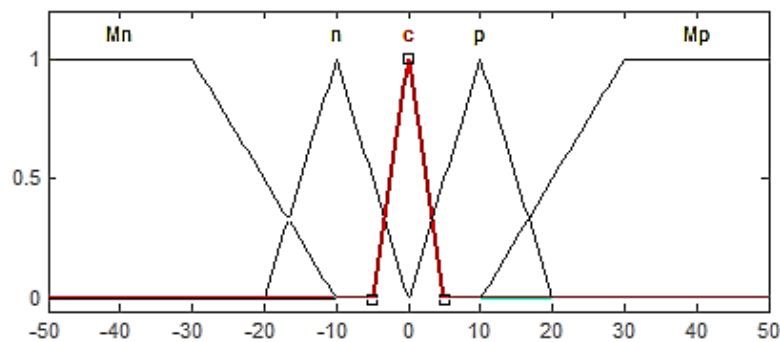


Figura. 3. 14. Función de pertenencia del error.

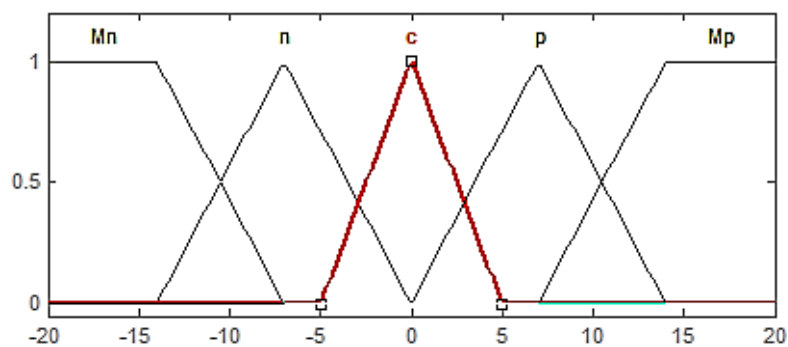


Figura. 3. 15. Función de pertenencia de la integral del error.

3.2.4 Base de conocimiento:

La evaluación de reglas se lleva a cabo usando la información de los valores encontrados en la fusificación para luego producir salidas difusas. La base del conocimiento de control global que el Pi difuso necesita para realizar la toma de decisión se resume en los siguientes conjuntos de reglas:

error/ $\int error(t) dt$	Mn	N	C	P	Mp
Mn	Muy baja	Muy baja	Muy baja	Muy baja	Muy baja
n	Muy baja	Muy baja	Muy baja	baja	Media
C	Muy baja	Muy baja	Baja	media	Alta
P	Baja	Media	Alta	Muy alta	Muy alta
Mp	Media	Alta	Muy alta	Muy alta	Muy alta

Tabla. 3. 3. Base de reglas para el controlador PI difuso.

Donde el uso del conjunto de reglas se muestra a continuación para una mejor interpretación del control Pi difuso, cabe recalcar que una vez que las reglas han sido establecidas, un FLS puede ser visto como un mapeo que puede ser expresado cuantitativamente como $z=f(x)$, por lo que la salida del conjunto de reglas queda como:

Ejemplo: **Si** error es Mn **Y** $\int error(t)$ es Mn **Entonces** $z=f(\text{temperatura})$

Para defusificar el valor difuso obtenido de la inferencia, se debe calcular:

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot Z_i}{w_i}$$

Donde z =salida final del sistema, Para el nivel de salida de cada regla z_i se pondera por w_i (fuerza de disparo). Por ejemplo, para una regla **and** de entrada $x=A$ e $y=B$, la fuerza de disparo es:

$$w_i = \mathbf{and}(\mu_A(x), \mu_B(x))$$

Donde:

$\mu_A(x)$, $\mu_B(x)$ son funciones de pertenencia.

De este modo la salida sería:

$$w_i = \mathbf{and}(Mn, Mn) = \mathbf{and}(1,1)=1$$

z_i = es una constante, el rango de muy negativo su valor es de cero

$Z=1*0/1=0$ o expresado de otra manera la salida sería muy baja.

3.3. Modelamiento del sistema de Caudal

Para el control de caudal se utilizará un sistema hidráulico que será de realimentación continua lo que significa que el agua circulará por todo el sistema en forma de lazo cerrado, de esta manera se garantiza el ahorro de agua y el abastecimiento constante de la misma.

Los datos utilizados en el diseño del sistema hidráulico correspondientes a la estructura del módulo didáctico se muestran en la Tabla. 3. 4.

Variable	Valor
Caudal	0.06 m ³ /s
Presión de succión	0.05 m
Presión de descarga	1 m
Longitud de descarga	3 m

Tabla. 3. 4. Datos de diseño-tubería.

Sabiendo que la velocidad será de 2 m/s, debido a consideraciones de diseño.

$$Q = V * A$$

$$A = \frac{Q}{V} = \frac{0,06}{2}$$

$$A = 0,03 \text{ m}^2$$

Para hallar el diámetro de la tubería se aplica la siguiente ecuación.

$$D = \sqrt{\frac{4 * A}{\pi}}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * 0,03}{\pi}}$$

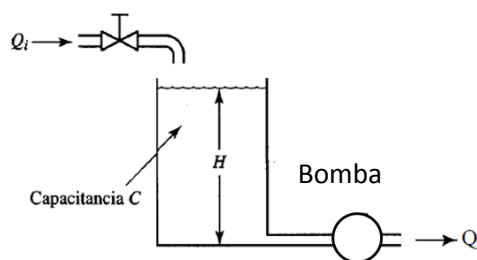
$D = 0,19 = 190$ mm [diámetro teórico], de tal manera que el diámetro comercial sería: 200 mm

Corrigiendo la velocidad con el nuevo diámetro,

$$V = \frac{4 * 0,06}{\pi * 0,2}$$

$$V = 0.38 \text{ m/s}$$

3.3.1. Modelo de Caudal



Al analizar sistemas que implican el flujo de líquidos, resulta necesario dividir los regímenes de flujo en laminar y turbulento, de acuerdo con la magnitud del número de Reynolds. Si el número de Reynolds es mayor que entre 3000 y 4000, el flujo es

turbulento. El flujo es laminar si el número de Reynolds es menor que 2000. En el caso laminar, tiene lugar un flujo estable en las corrientes, sin turbulencia. Los sistemas que contienen un flujo turbulento a menudo deben representarse mediante ecuaciones diferenciales no lineales, en tanto que los sistemas con un flujo laminar pueden representarse mediante ecuaciones diferenciales lineales. (Con frecuencia los procesos industriales implican un flujo de líquidos a través de tubos y tanques conectados. El flujo en tales procesos resulta a menudo turbulento y no laminar)^[7].

De lo indicado es necesario realizar el cálculo del número de Reynolds para determinar el tipo de flujo que se va a controlar de la siguiente manera:

$$Re = \frac{\rho * v * d}{u}$$

Donde:

Re = Numero de Reynolds

d = Diámetro del ducto

v = Velocidad promedio del liquido

ρ = Densidad del líquido

u= Viscosidad del liquido

$$A = 0,03 \text{ m}^2$$

$$Q = A * v$$

$$Q = 0.06 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$V = 2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$Re = \frac{0.2m * 2 \frac{m}{s} * 1000 \frac{kg}{m^3}}{1002 * 10^{-6} \frac{kg}{ms}}$$

$$Re = 399201,5968$$

Si se introduce el concepto de resistencia y capacitancia para tales sistemas del nivel de líquido, es posible describir en formas simples las características dinámicas de tales sistemas. Considerando el flujo a través de un tubo corto que conecta dos tanques. La resistencia R para el flujo de líquido en tal tubo se define como el cambio en la diferencia de nivel (la diferencia entre el nivel de líquido en los dos tanques) necesaria para producir un cambio de una unidad en la velocidad del flujo; es decir,

$$R = \frac{\text{cambio en la diferencia de nivel, m}}{\text{cambio en la velocidad de flujo, } \frac{m^3}{\text{seg}}}$$

Dado que la relación entre la velocidad del flujo y la diferencia de nivel es distinta para el flujo laminar y el flujo turbulento, en lo sucesivo consideraremos ambos casos. Considere el sistema del nivel de líquidos que aparece en la figura. En este sistema el líquido sale a chorros a través de la bomba a un lado del tanque y debido a que el flujo es turbulento, el caudal en estado estable se obtiene mediante

$$Q = K\sqrt{H}$$

Donde

Q = Caudal del líquido en estado estable, m^3/seg

K = coeficiente, $m^{2.5}/\text{seg}$

H = altura en estado estable, m

Por lo que el modelo matemático del sistema basado en la ecuación de balance de energía queda:

$$q_i = q_s + q_a$$

$$q_a = A \frac{dh}{dt}$$

$$q_s = k\sqrt{h}$$

$$q_i = k\sqrt{h} + A \frac{dh}{dt}$$

La Figura. 3. 16 muestra el diagrama de bloques, donde se tiene una fuente de voltaje la cual es la salida para el control de caudal, este voltaje se ingresa al variador de frecuencia, mediante el cual cambia la velocidad de la bomba y por lo tanto el caudal (q_i). Para hallar la relación del caudal q_i en función del voltaje de salida del controlador, se realizó la toma de datos como se muestra a continuación:

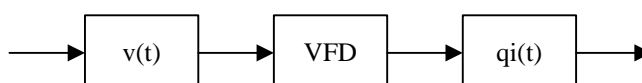


Figura. 3. 16. Diagrama de bloques del voltaje en relación con el caudal.

qi=f(rpm)=f(v)					
Voltaie	qi	Voltaie	Oi	voltaie	Oi
3.5	17.48	5.7	31.16	7.9	43.7
3.6	18.27	5.8	31.84	8	43.91
3.7	18.81	5.9	32.54	8.1	44.09
3.8	19.23	6	33.13	8.2	44.28
3.9	20.21	6.1	33.91	8.3	44.9
4	20.51	6.2	34.34	8.4	45.21
4.1	21	6.3	35	8.5	45.87
4.2	21.76	6.4	35.7	8.6	46.54
4.3	22.43	6.5	36.2	8.7	47
4.4	23.24	6.6	36.365	8.8	47.44
4.5	23.67	6.7	37.08	8.9	47.93
4.6	24.21	6.8	37.82	9	48.33
4.7	24.96	6.9	38.76	9.1	48.73

4.8	25.63	7	39.41	9.2	49.29
4.9	26	7.1	39.9	9.3	49.91
5	26.76	7.2	40.55	9.4	51.43
5.1	27.11	7.3	41.19	9.5	51.95
5.2	28	7.4	41.8	9.6	52.46
5.3	28.63	7.5	42.27	9.7	53
5.4	29.07	7.6	42.4	9.8	53.47
5.5	29.71	7.7	42.95	9.9	54.23
5.6	30.61	7.8	43.4	10	55

Tabla. 3. 5. Datos obtenidos de caudal en función del voltaje.

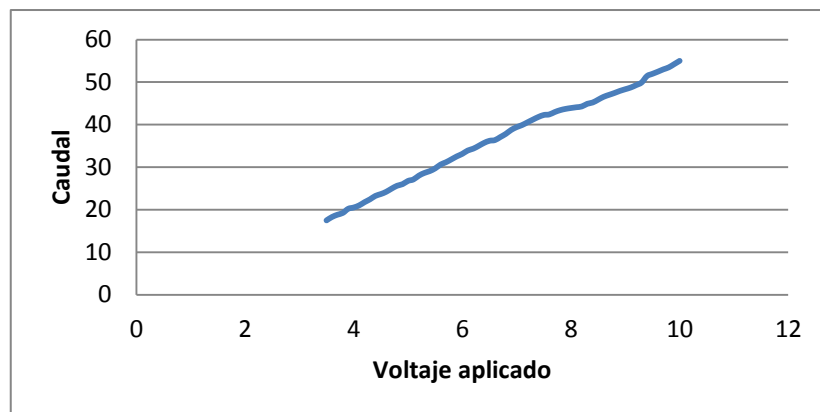


Figura. 3. 17. Curva de respuesta del caudal en función del voltaje.

Obteniéndose la siguiente ecuación para el caudal:

$$q_i = -0,1667x^2 + 7,8752x - 8,2349$$

Donde :

x: voltaje aplicado al variador para el control de caudal.

qi: caudal de entrada

Remplazando obtenemos la ecuación de la planta de caudal:

$$-0,1667x^2 + 7,8752x - 8,2349 = k\sqrt{h} - A \frac{dh}{dt}$$

A partir de la ecuación hallada anteriormente se obtiene el siguiente diagrama de bloques que representa el modelo matemático de la planta de caudal como se observa en la Figura. 3. 18

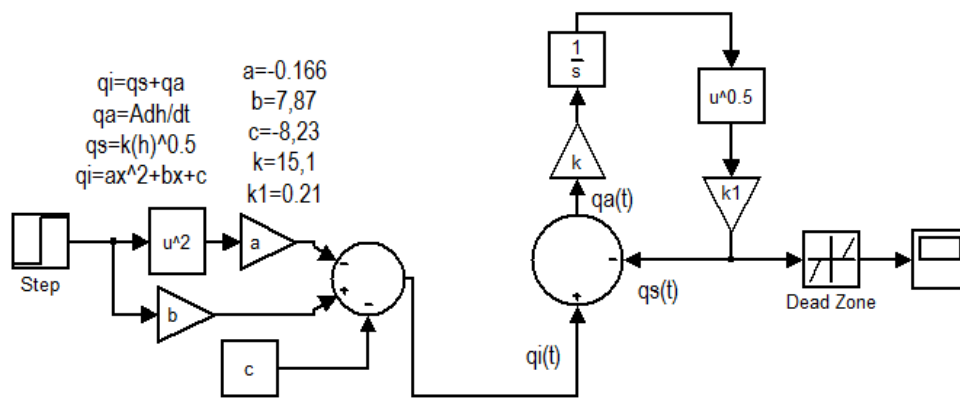


Figura. 3. 18. Modelo no lineal.

Al comprobar la simulación podemos observar la respuesta en el tiempo del modelo matemático.

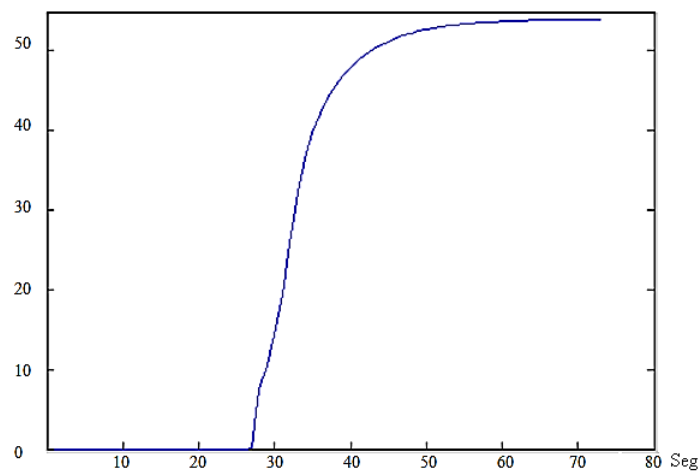


Figura. 3. 19. Respuesta en el tiempo del modelo matemático de la planta de caudal.

3.4. Diseño del control de Caudal

Para un mejor entendimiento del control, se ilustra en la Figura. 3.20 el diagrama de instrumentación, como se observa la parte encerrada es la instrumentación utilizada en el control de caudal.

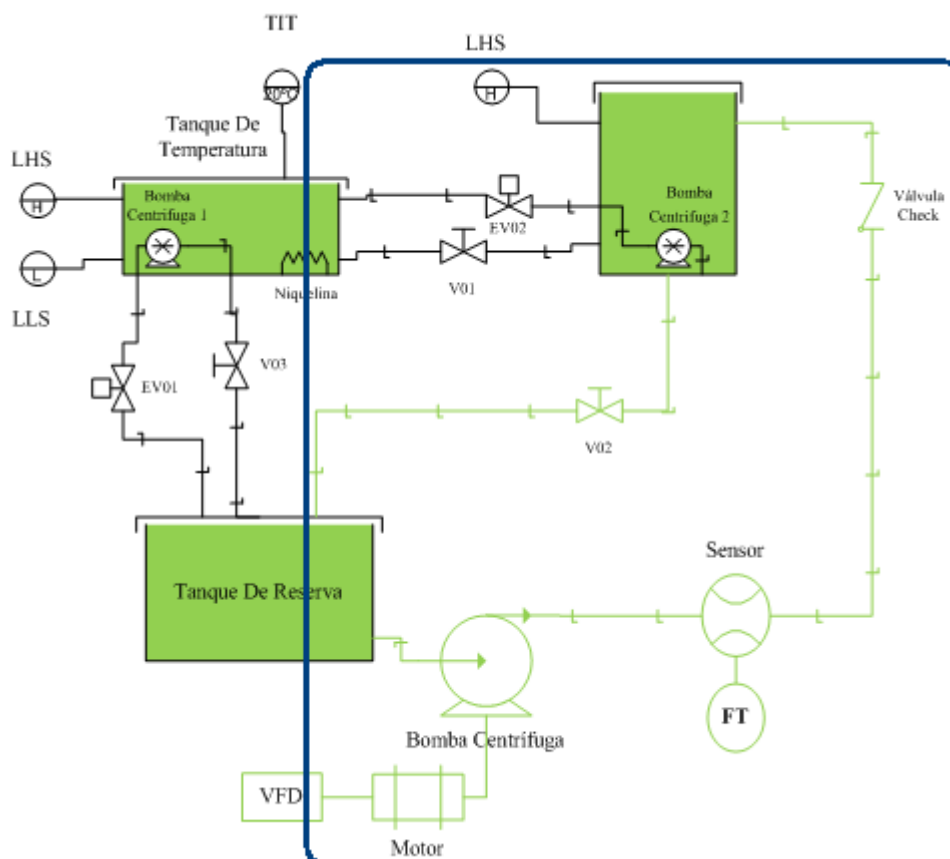


Figura. 3. 20. Diagrama de instrumentación

3.4.1 Especificaciones del Problema

Como característica del control el caudal máxima será de 50 l/min, mientras el caudal inicial del proceso será de 20 l/min, debido que la bomba usada para este control funciona correctamente en este rango.

3.4.2 Solución del Problema

Para el control de caudal se utilizará un PI difuso ya que este nos permite eliminar el error en estado estable, necesario debido a que el caudal es turbulento y no permite un buen control.

3.4.3 Sintonización del controlador Pi difuso

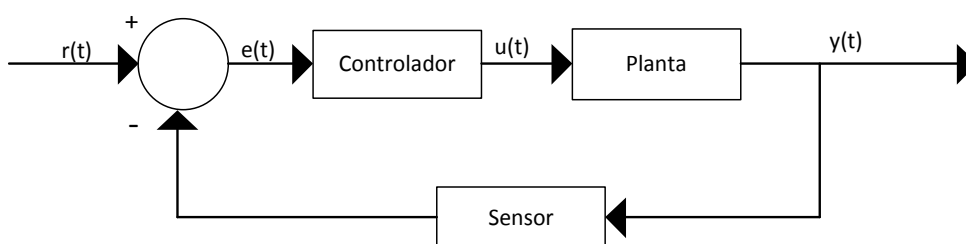


Figura. 3. 21. Representación del diagrama de bloques del sistema.

A partir de los parámetros del PI convencional se dispuso a sintonizar un controlador PI difuso con las siguientes entradas:

$$e(t) = r(t) - y(t)$$

$$\int e(t)$$

Siendo $y(t)$ la salida del sistema de caudal y $r(t)$ la referencia asignada.

Aplicado el método de oscilación de Ziegler-Nichols obtenemos la siguiente respuesta en lazo cerrado para lo cual obtenemos la ganancia crítica como se muestra en la siguiente Figura. 3. 22 ^[7].

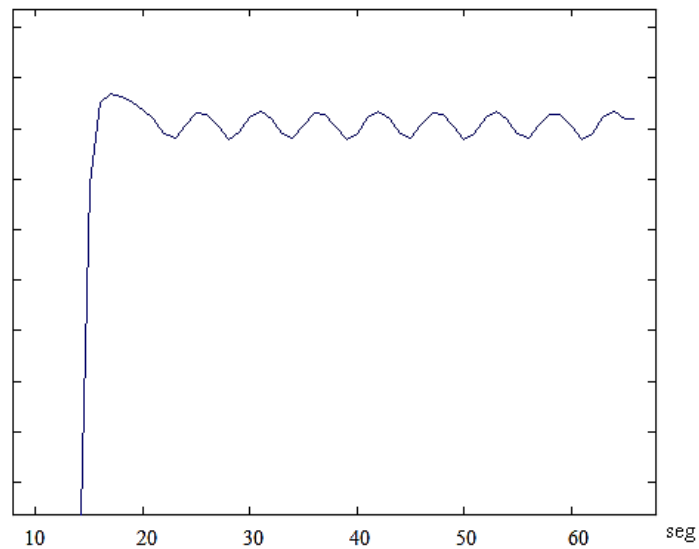


Figura. 3. 22. Respuesta en lazo cerrado para una ganancia $k=3$.

Donde:

K_c : k crítica del sistema

K_p : ganancia proporcional aplicada al sistema en lazo cerrado

Para un $K_p=3= K_c$ tenemos un período de oscilación $P_c=16$ seg como se puede observar en la figura, aplicando las formulas del Método de oscilación de Ziegler-Nichols obtenemos:

$$K_p = 0,45k_c$$

$$K_p = 1,35$$

$$T_i = p_c/1,2$$

$$T_i = 13,3$$

Las ganancias GE, GCE y GU para la sintonía de un controlador PI difuso a partir de los parámetros del PI convencional propuestas por Jan Jantzen ^[5] son:

$$GU = \frac{Kp}{GE}$$

$$\frac{1}{Ti} = \frac{GIE}{GE}$$

Dado que el universo normalizado de discurso del error esta determinado en el rango [-50 50] necesariamente el primer ajuste debe considerarse como GE=0.5 de esta manera las constantes del controlador difuso se indican:

$$GE=0.5$$

$$GU = \frac{Kp}{GE}$$

$$GU = \frac{1,35}{0,5} = 2.7$$

$$GIE = \frac{GE}{Ti}$$

$$GIE = \frac{0,5}{13,3} = 0,04$$

De esta manera el lazo de control se representaría de la siguiente manera como se muestra en la Figura. 3. 23:

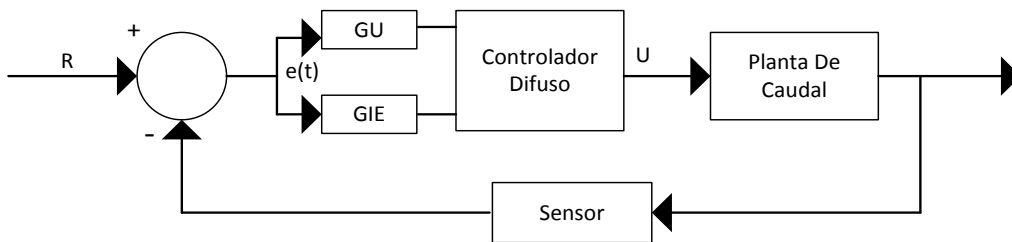


Figura. 3. 23. Lazo de control para la planta de Caudal.

Los métodos de inferencia incluyen AND, OR, implicación, agregación y métodos de defusificación. Esta acción genera los valores de salida para el sistema difuso; Para este caso se usa el tipo Sugeno como se muestra a continuación:

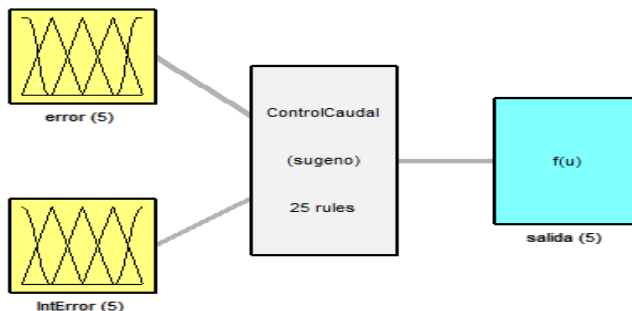


Figura. 3. 24. Definición de las entradas y salidas en la interfaz gráfica de usuario Fis.

Se definio los conjuntos difusos para el error y la integral del error respectivamente como se muestra en la Figura. 3.25.

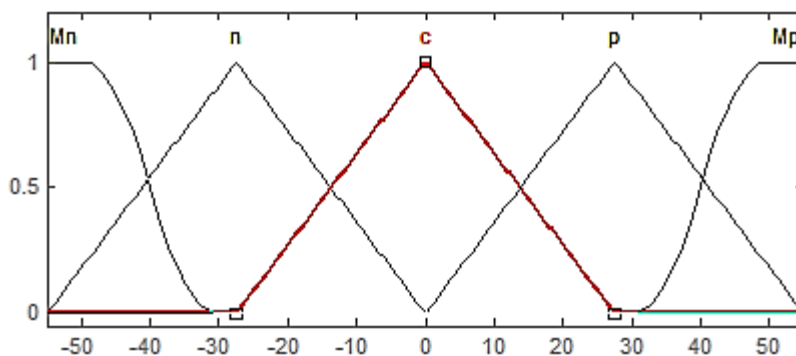


Figura. 3. 25. Función de pertenencia del error.

Donde:

Mn: muy negativo

n: negativo

c: cero

p: positivo

Mp: muy positivo

La base del conocimiento de control global que el PI difuso necesita para realizar la toma de decisión se resume en los siguientes conjuntos de reglas:

error/ $\int \text{errore}(t) dt$	Mn	N	c	p	Mp
Mn	Muy baja	Muy baja	Muy baja	Baja	media
N	Muy baja	Muy baja	baja	Media	alta
C	Muy baja	baja	media	Alta	Muy alta
P	Baja	media	alta	Muy alta	Muy alta
Mp	Media	alta	Muy alta	Muy alta	Muy alta

Tabla. 3. 6. Base de reglas para el controlador PI difuso.

Donde el uso del conjunto de reglas se muestra a continuación para una mejor interpretación del control Pi difuso:

Ejemplo: **Si** error es Mn **Y** $\int \text{errore}(t)$ es p **Entonces** $z=f(\text{caudal})$

[9] Kevin M. Passino, Stephen Yurkovich, "Fuzzy Control", Department of Electrical Engineering The Ohio State University, 1998.

Para defusificar el valor difuso obtenido de la inferencia, se debe calcular:

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n w_i z_i}{w_i}$$

Donde z=salida final del sistema, Para el nivel de salida de cada regla z_i se pondera por w_i (fuerza de disparo). Por ejemplo, para una regla **and** de entrada $x=A$ e $y=B$, la fuerza de disparo es:

$$w_i = \mathbf{and}(\mu_A(x), \mu_B(x))$$

Donde:

$\mu_A(x)$, $\mu_B(x)$ son funciones de pertenencia.

De este modo la salida seria:

$$w_i = \mathbf{and}(Mn, p) = \mathbf{and}(1, 0.5) = 0.5$$

z_i es una constante, el rango de muy negativo su valor es de cero

$Z = 0.5 * 12.5 / 0.5 = 6.25$ expresada de otra manera la salida seria = baja.

Cada una de las reglas está compuesta de un antecedente y una consecuencia. Los antecedentes se asocian a las entradas del sistema ($e(t)$ y $\int e(t)$). La consecuencia es la acción de control que el controlador difuso determina ejercer sobre la planta.

El controlador será capaz de determinar la salida o conclusión más apta para ejecutar, evaluando cuales reglas son válidas para el caso actual de la planta. Para ello va examinando cada una de las entradas, las que, dependiendo del valor real que tengan, se clasifican en los valores lingüísticos con que se han definido las reglas de control (Tabla 1). De esta manera se conforman los conjuntos difusos para cada una de las entradas del controlador. Las salidas también se clasifican en conjuntos difusos. En este caso se mencionan 5 conjuntos: Muy negativo (Mn), negativo (n), cero (c), positivo (p), Muy positivo (Mp). La cuantificación de las variables se realiza midiendo el grado de pertenencia de ellas a cada uno de estos conjuntos difusos por medio de las funciones de membrecía, las cuales cuantifican en un rango $[0,1]$ el nivel de membrecía que presenten el $e(t)$ y el $\int e(t)$ en cada uno de los conjuntos difusos ^[9].

[9] Kevin M. Passino, Stephen Yurkovich, "Fuzzy Control", Department of Electrical Engineering The Ohio State University, 1998.

CAPÍTULO IV

INFORMACIÓN DETALLADA DEL SISTEMA CONSTRUIDO

El hardware implementado en el presente proyecto de grado está constituido por una planta, un computador de escritorio, una tarjeta de adquisición de datos PCI 6221, un conector SCB-68, un cable tipo SHC68-68-EPM, una tarjeta de acoplamiento de señales y cableado en general como se muestra en la Figura. 4. 1.

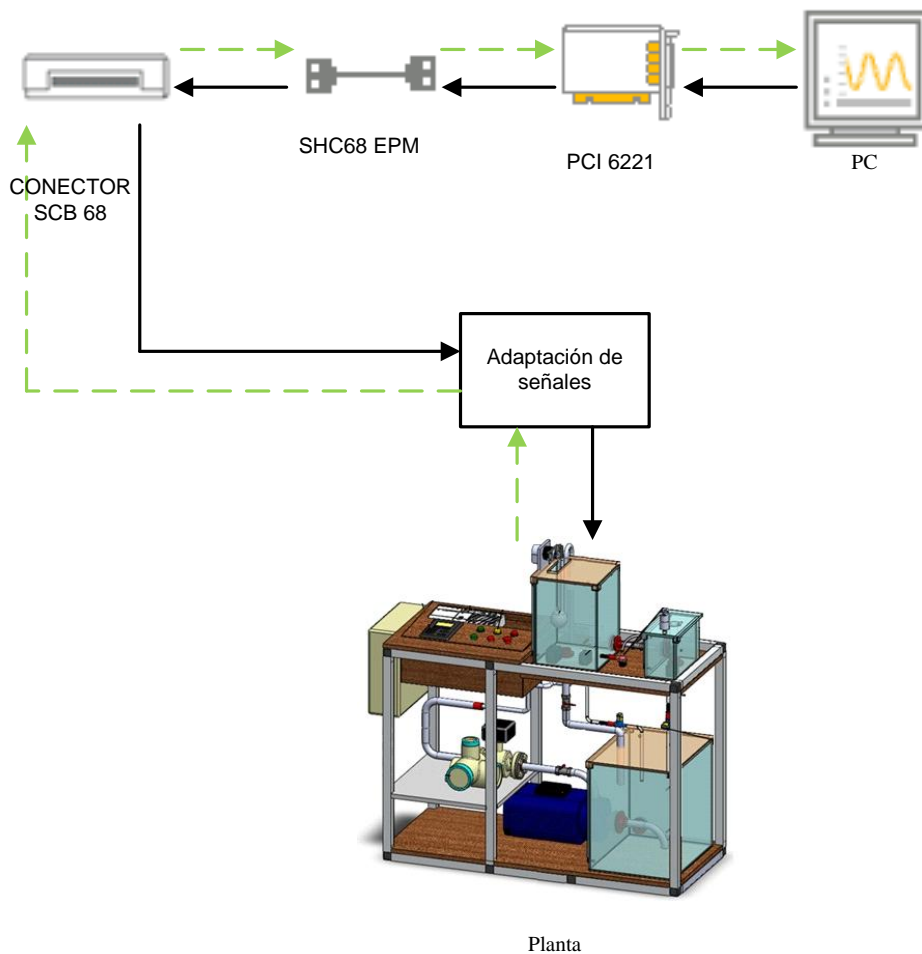


Figura. 4. 1. Diagrama General de Componentes Del Sistema.

Cabe recalcar que las características de la planta, de la tarjeta de adquisición de datos PCI 6221, del conector SCB-68 y del cable tipo SHC68-68-EPM ya fueron descritas en el Capítulo 2.

Computadora

Al trabajar con la herramienta RTW de Matlab® el programa interacciona directamente con las interrupciones del procesador de la computadora y como se utilizó la tarjeta de adquisición de datos PCI 6221 cuyo driver en Matlab® se encuentra disponible desde la versión 7.5 se vio la necesidad de utilizar un computador que cumpla con las características detalladas a continuación en la Tabla.

Hardware	Requerimientos Mínimos	Utilizado
CPU	Pentium	Pentium IV 3,2 GHz
Disco Duro	16 MB libres	120 GB
Tarjeta de adquisición de datos	Compatible con RTWT y RTW	PCI 6221 National Instruments
RAM	256 MB	1 GB

Tabla. 4. 1. Características de la computadora usada.

4.1. Descripción del diagrama de conexiones físicas

Las entradas y salidas usadas de la tarjeta de adquisición de datos National Instruments PCI-6221 son las siguientes:

Digital 1: Salida PWM para el control de temperatura (P0.0)

Digital 2: Salida de activación de la bomba1 (P0.1)

Digital 3: Salida de activación de la bomba2 (P0.2)

Digital 4: Entrada del nivel bajo del tanque de temperatura (P0.3)

Digital 5: Entrada del nivel alto del tanque de temperatura (P0.4)

Digital 6: Entrada del nivel bajo del tanque de reserva (P0.5)

Digital 7: Entrada del botón de emergencia (P0.6)

Análoga 1: Salida para el control del motor trifásico (AO 0)

Análoga 2: Entrada del valor actual del sensor de temperatura (AI 0)

Análoga3: Entrada del valor actual del sensor de Caudal (AI 1)

La Figura. 4. 2 muestra la conexión física de las entradas y salidas tanto analógicas como digitales que fueron usadas en la tarjeta.

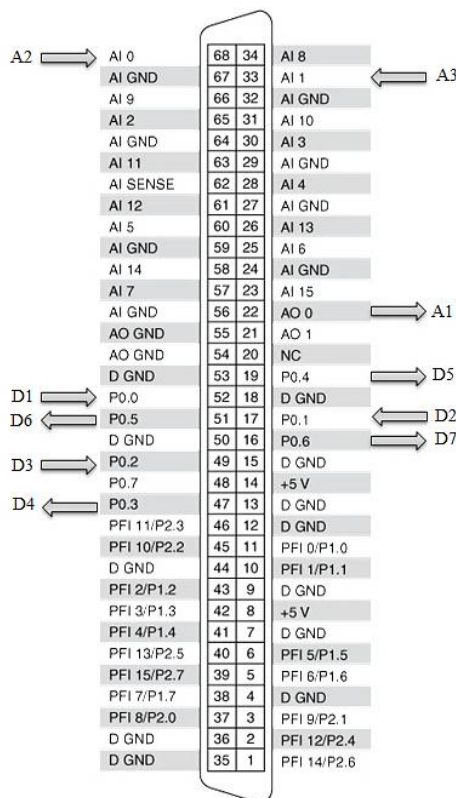


Figura. 4. 2. Terminales usados para el control difuso.

A continuación se muestra la conexión física realizada para el control difuso tanto de temperatura como de caudal.

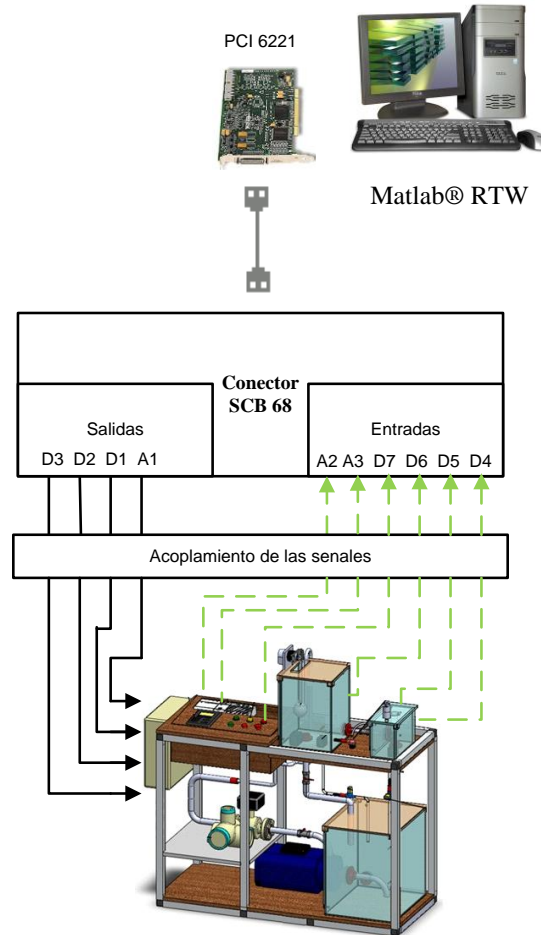


Figura. 4. 3. Diagrama de conexiones.

4.2. Adaptación de las señales de control.

Debido a que los sensores utilizados para realizar el control en el módulo didáctico entrega una corriente de 4 a 20 mA se realizó una adaptación de la señal, mediante un conversor de corriente a voltaje como se puede observar en la Figura. 4. 4.

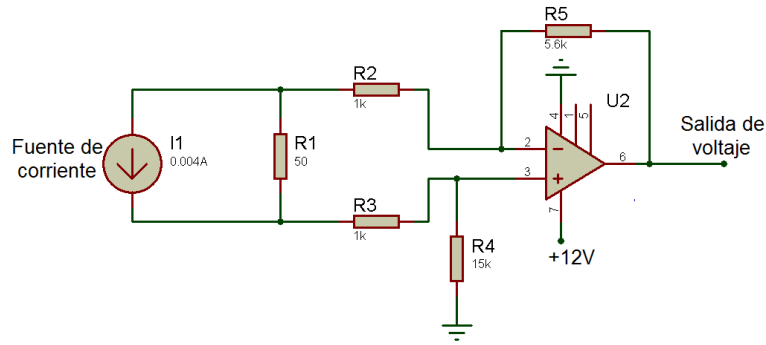


Figura. 4. 4. Conversor de corriente a voltaje.

Análisis del circuito

Al colocar la resistencia R1 en paralelo la fuente de corriente y la resistencia se puede asumir que es una fuente de voltaje, además para facilitar el calculo podemos asumir que R2=R3 y R4=R5, quedando el circuito como se muestra en la figura.

Despejando V_o la tensión de salida se obtiene como:

$$V_o = R_2/R_1(V_1 - V_2)$$

4.3. Diagrama de bloques del sistema de control

El sistema de control de temperatura y caudal posee un actuador que está gobernado por voltajes de 0-10 VDC, de la misma manera posee un sensor que emitirá señales de corriente de 4-20 mA, estos dos tienen una etapa de acondicionamiento de la señal, el proceso de conversión análogo digital y digital análogo se produce internamente mediante la tarjeta de adquisición de datos PCI 6221, y estos datos son llevados a Simulink® mediante la herramienta RTW de MATLAB® donde se encuentra el controlador y el setpoint, que gracias a la herramienta RTW puede variar sus parámetros en tiempo real

desde esta plataforma, a continuación se presenta en la Figura el diagrama de bloques del sistema de control.

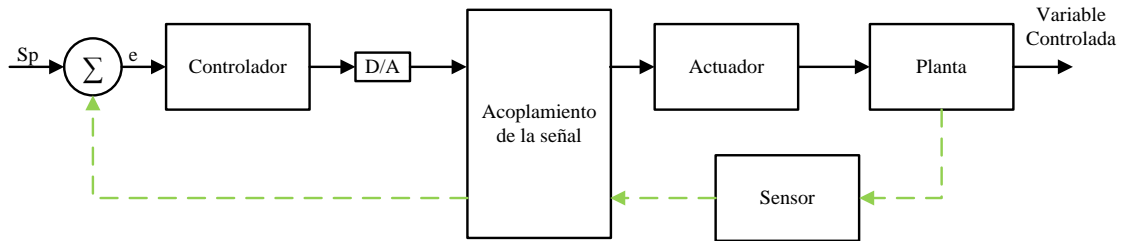


Figura. 4. 5. Diagrama De Bloques Del Sistema De Control.

4.5. Descripción del Software

Para poder comprender de una mejor manera el diseño de una aplicación en tiempo real mediante Matlab® a continuación se hace una descripción detallada tanto del control de caudal como del control de temperatura.

Descripción Del Control De Temperatura

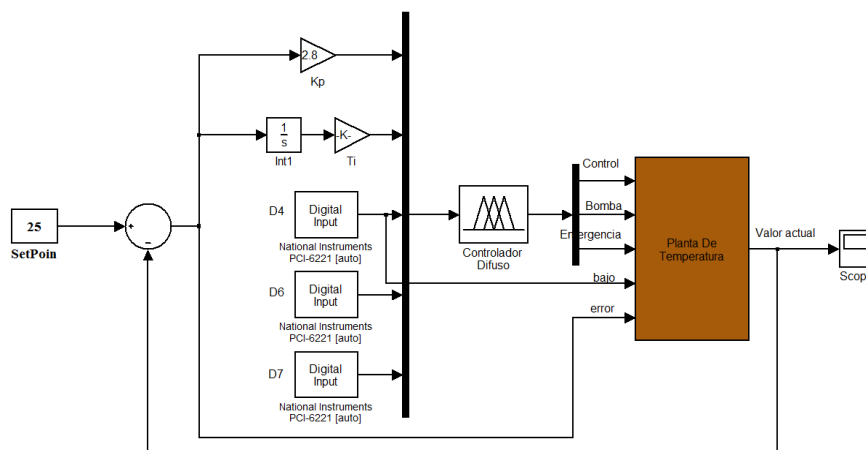


Figura. 4. 6. Lazo de control de la planta de temperatura.

El control difuso consta de cinco entradas para las bases de reglas de control difuso, cuyas reglas ya fueron explicadas en el capítulo anterior y tres salidas para el control.

Donde Las entradas al control difuso son las siguientes:

Error multiplicado con una ganancia proporcional igual a K_p .

La integral del error multiplicado por una ganancia T_i .

Digital 4: Representa el nivel en bajo del tanque de temperatura.

Digital 6: Representa el nivel bajo del tanque de reserva.

Digital 7: Representa el botón de emergencia que desactiva todas la salidas en caso de mal funcionamiento.

Salidas del control difuso:

Control: Salida de control.

Bomba: Salida de control de la bomba.

Emergencia: Variable de emergencia que apaga las salidas en caso de emergencia.

El bloque que representa la planta en el cual se realiza el control consta de cinco entradas y una salida como se puede ver en la siguiente Figura. 4. 7.

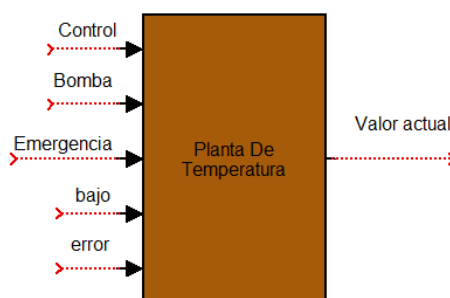


Figura. 4. 7. Representación de la planta de temperatura.

Este bloque internamente consta de:

Salida De Control (PWM)

Esta salida PWM es el resultado del control difuso, el cual permite variar el PWM para el control de temperatura mediante la manipulación de la niquelina.

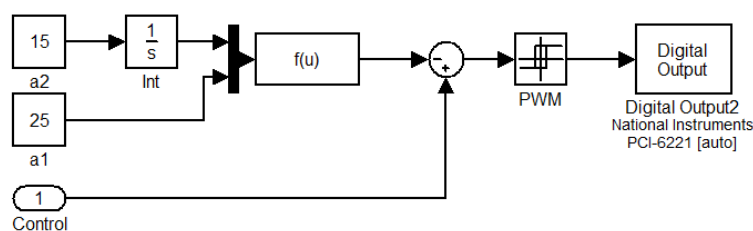


Figura. 4. 8. Salida PWM a partir del control difuso.

Valor actual de la temperatura

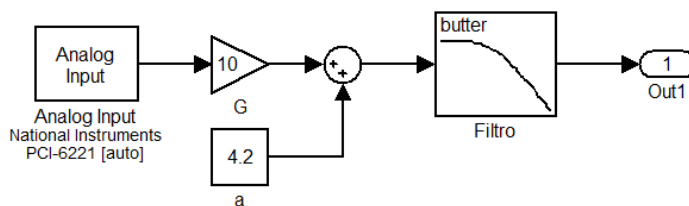


Figura. 4. 9. Obtención de la temperatura real.

Este bloque toma la señal del sensor de temperatura Allen Bradley 873E cuya salida analógica entrega 4 a 20 mA, esta señal se la transformó a voltaje el cual varía de 0v a 5v que representa la temperatura real de 0 a 50°C, por lo que es necesario hacer una transformación a grados centígrados mediante una ecuación lineal obtenida en la toma de datos la cual se muestra a continuación:

Voltaje	1,58	1,78	1,98	2,18	2,38	2,58	2,78	2,98
°C	20	22	24	26	28	30	32	34
Voltaje	3,18	3,38	3,58	3,78	3,98	4,18	4,38	4,58
°C	36	38	40	42	44	46	48	50

Tabla. 4. 2. Valores obtenidos para la temperatura.

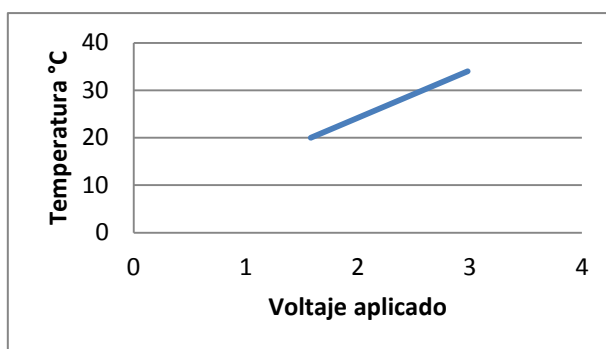


Figura. 4. 10. Curva obtenida de temperatura.

Control del tanque de reserva

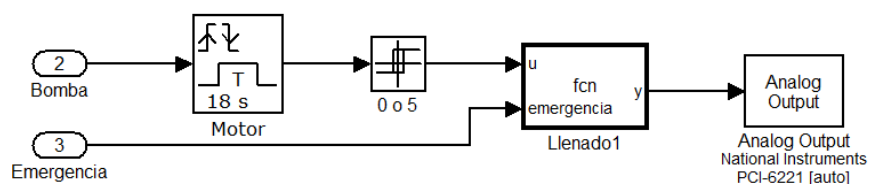


Figura. 4. 11. Salida de control del motor.

En caso de que el tanque de reserva se encuentre en un nivel bajo el motor se enciende para llenarlo hasta un nivel mínimo, a partir de la señal de control que entrega el control difuso llamada " Bomba ", además en caso de emergencia esta se apagará para evitar derrames, esta señal de emergencia es entregada por el control difuso si se oprime el botón físico que se encuentra en el panel de control del módulo.

Nivel bajo del tanque de temperatura

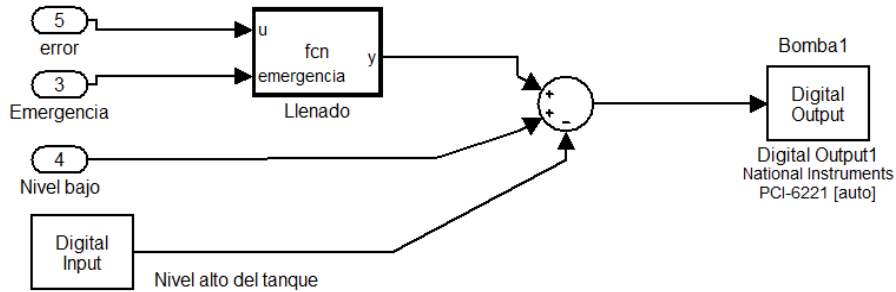


Figura. 4. 12. Bloque de control del nivel bajo.

En caso de que el nivel sea bajo en el tanque de temperatura el controlador difuso se apaga hasta llegar al nivel mínimo activando la bomba 1, además en caso de emergencia esta se apagará.

También cabe mencionar que la bomba 1 se activará cuando la temperatura sea mayor a 1°C para enfriar y llegar al valor deseado.

Nivel alto del tanque de temperatura

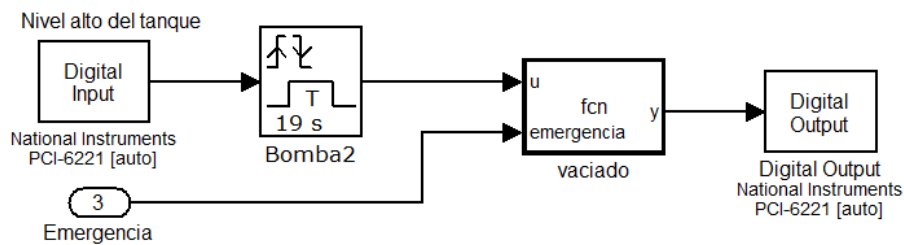


Figura. 4. 13. Bloque de control del nivel alto.

Cuando el nivel de agua sobrepasa el valor máximo se activa la bomba 2 para vaciar y llegar al nivel mínimo para el control.

Descripción Del Control De Caudal

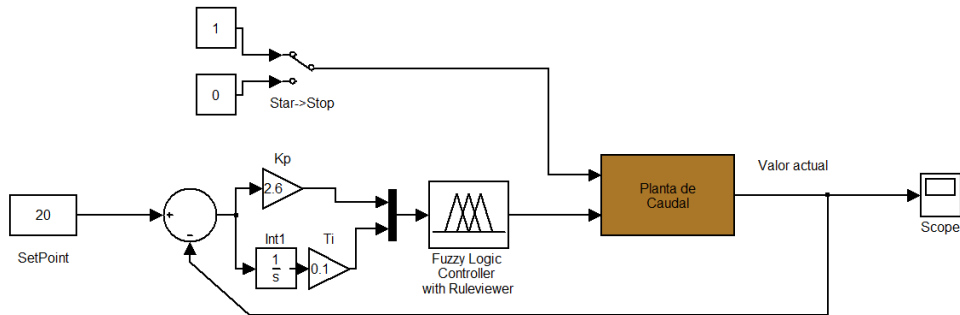


Figura. 4. 14. Lazo de control de caudal.

El control difuso consta de dos entradas, el error y la integral del error y una salida que viene a ser la señal de control para el caudal.

El bloque que representa la planta de caudal tiene como entradas la salida del controlador difuso y un switch que representa el botón de start y stop para la planta de temperatura, su salida es el valor real del caudal. Internamente el bloque consta de:

Salida de control de Caudal

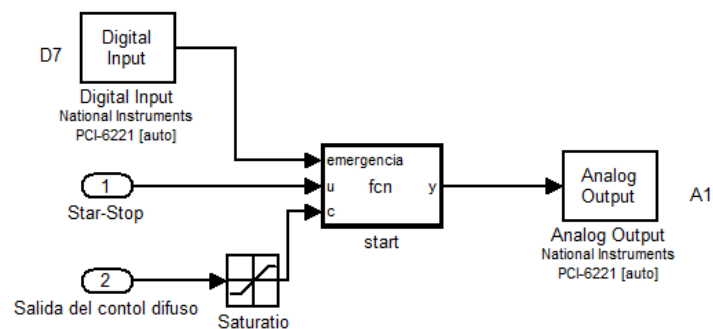


Figura. 4. 15. Salida de control aplicada al variador de frecuencia.

Para que la salida de control de caudal pueda ejecutarse primero tiene que activarse el botón start o a su vez stop si quiere apagarlo, además no tiene que estar pulsado el botón de emergencia ya que si este está pulsado se apaga todas las salidas de control y no funcionara.

Valor actual de caudal

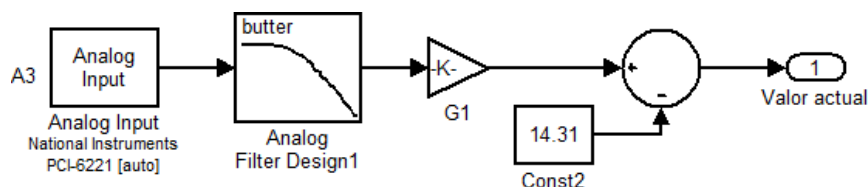


Figura. 4. 16. Dato de entrada del sensor.

Este bloque toma la señal del medidor de flujo SIEMENS SITRANS F M MAG 5100 W 3E cuya salida analógica entrega 4 a 20 mA, esta señal se la trasformó a voltaje el cual varía de 0v a 5v que representa el caudal real de 0 a 50l/min, por lo que es necesario hacer una transformación a l/min mediante una ecuación lineal obtenida en la toma de datos la cual se muestra a continuación:

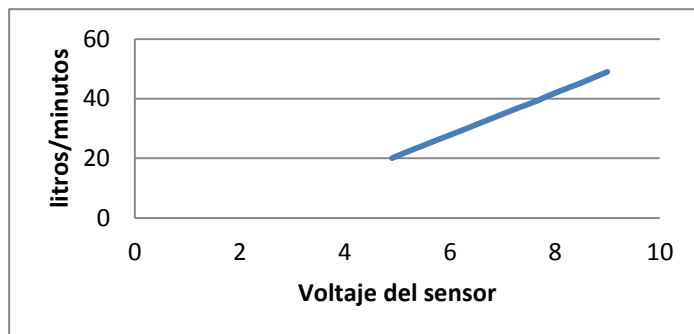


Figura. 4. 17. Conversión de voltaje a litros/ minutos.

CAPÍTULO V

PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

5.1. Eficiencia del control PI difuso

A continuación se hace la variación de la constante proporcional e integral K_p , T_i respectivamente para la cual se ha obtenido los siguientes resultados de eficiencia al igual que las curvas de repuesta.

5.1.1 Criterio integral de error cuadrático, (CIEC)

La cantidad a evaluar es la siguiente:

$$\int_0^{\infty} e^2(t) \cdot dt$$

El objetivo será entonces minimizar el valor de esta integral (criterio válido para los siguientes índices). Las principales características son:

Se da mayor importancia a los errores grandes.

No es un criterio muy selectivo.

Respuesta rápida pero oscilatoria, estabilidad relativa pobre.

Control de temperatura

Kp	1	2	3	4
Ti		0,02		
CIEC	173,3	165,8	165	164,7

Tabla. 5. 1. CIEC del control de temperatura.

La tabla. 5. 1 muestra la eficiencia del control de temperatura al variar la ganancia Kp para un Ti=0,02 el cual se obtuvo de la misma manera variando Ti y manteniendo fijo el valor de Kp y el resultado obtenido es que el Ti mas eficiente es 0,02; Por esta razón se mantiene fijo el Ti y se ilustra las graficas para la variación de Kp.

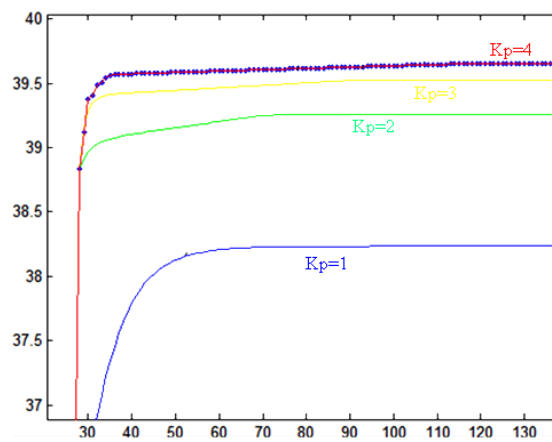


Figura. 5. 1. Resultado del control de temperatura para un SetPoin=40,Ti=0,02 y Kp.

Control de Caudal

Kp	Ki	CIEC	Kp	Ki	CIEC
1	0,01	4008		0,01	3814

	0,03	1524	2	0,03	2312
	0,05	2436		0,05	1611
	0,07	3169		0,07	1892
	0,09	4469		0,09	3051
Kp	ki	CIEC	Kp	ki	CIEC
	0,01	2795		0,01	2562
	0,03	2705		0,03	1935
3	0,05	1927		0,05	2644
	0,07	2253	4	0,07	2546
	0,09	2270		0,09	2453
kp	ki	CIEC			
	0,03	2472			
	0,05	1983			
2,6	0,7	1817			
	0,1	1702			
	0,12	1832			

Tabla. 5. 2. La tabla muestra resultado del CIEC para un Kp variable y Ti variable.

Como podemos observar el valor más adecuado es para un $K_p=2$ y $T_i=0.5$, sin embargo los valores hallados en el capítulo tres para el control PI difuso son para $K_p=2,6$ y $T_i=0.09$ donde podemos observar que también tienen un muy buena eficiencia por esta razón se a tomado estos datos para el control de caudal.

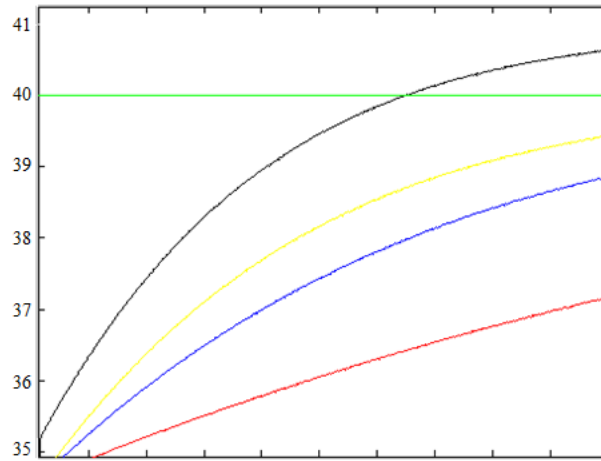


Figura. 5. 2. Respuesta del control de caudal para el $K_p=2,6$ y T_i variable.

Como podemos observar en la grafica anterior el valor mas optimo es $K_p=2,6$ y $T_i=0,1$, este valor es usado para realizar el control de caudal, también se puede ver los valores en la tabla 5.2.

5.2. Pruebas de funcionamiento del control de Temperatura.

Podemos ver la respuesta del controlador para diferentes valores de referencia entre 20 y 50°C en 600 segundos para un $K_p=2,8$ y $T_i=0,02$.

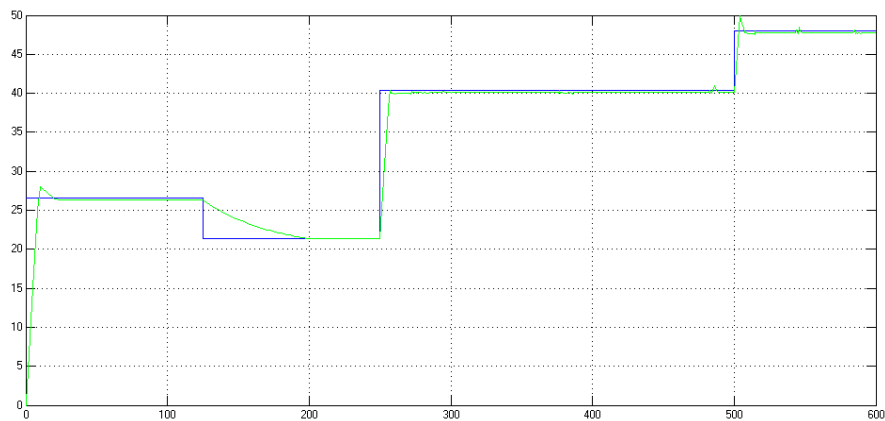


Figura. 5. 3. Prueba de funcionamiento del control de temperatura.

5.3. Pruebas de funcionamiento del control de Caudal.

En la Figura podemos ver la respuesta del controlador para diferentes valores de referencia en 250 segundos.

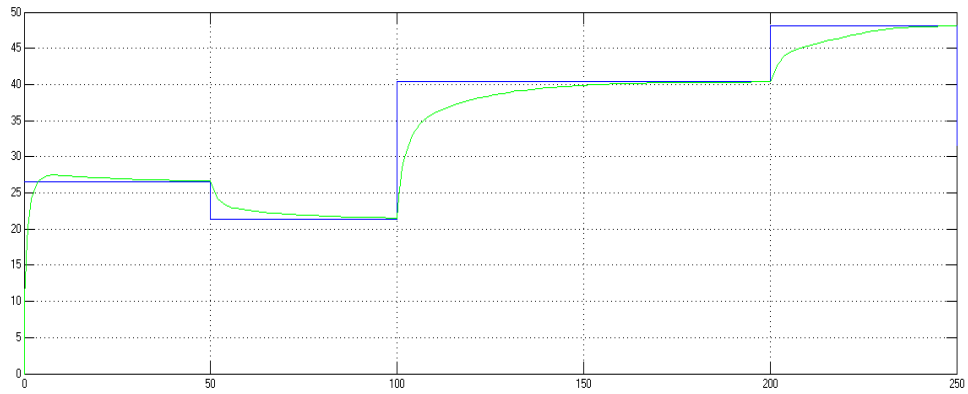


Figura. 5. 4. Prueba de funcionamiento del control de caudal para un setpoint variable.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- En el modelo Mamdani difuso la representación de las reglas difusas es más simple, lo que facilita su interpretación.
- El modelo Mamdani difuso para sistemas complejos no lineales usualmente requiere muchas reglas difusas Si-Entonces, lo que aumenta su complejidad.
- Para el control difuso se utilizó el modelo Takagi-Sugeno ya que este puede representar relaciones complejas y no lineales en un conjunto con un pequeño número de reglas difusas en comparación con el modelo Mamdani.
- El modelo matemático del sistema tanto del caudal como temperatura puede ser muy simple o muy compleja dependiendo de la exactitud con la que se quiera hallarlo, debido a esta razón todos los modelos matemáticos que se puedan hallar son validos.
- El modelo matemático ayuda a realizar la simulación del sistema de una manera rápida y segura si se desea probar un controlador antes de ejecutar físicamente y no causar algún daño en caso de no estar bien realizado el control.
- Debido a que Simulink no es un programa dedicado al desarrollo de interfaces de usuario, se dificultó en muchas ocasiones la asociación de variables o valores de interés para el monitoreo del control.
- Ya que en la tarjeta de adquisición de datos de National Instruments solo puede ingresar voltaje, se tuvo que realizar un conversor de corriente a voltaje y esto genero un ruido en la señal obtenida.

- Se comprobó que el control difuso se puede aplicar de manera rápida sin realizar el modelamiento matemático del sistema solo en base a la experiencia del operario.
- El control de temperatura se complicó debido a su inercia térmica, ya que si se lo calienta demasiado la única manera de enfriarlo es ingresando agua fría esto provoca un cambio brusco en la temperatura.
- La aplicación de un PWM es una solución al control de temperatura ya que este ayuda a mantener más estable la temperatura y evita variaciones bruscas.
- Una manera de sintonizar el control PID difuso es mediante el criterio integral de error cuadrático para de esta manera saber cuáles son las ganancias más apropiadas para el controlador.
- Las ganancias para un PID difuso se las pueden hallar mediante una relación con las ganancias del PID clásico propuestas por Jan Jantzen.

6.2. Recomendaciones

- Revisar el manual de usuario antes de realizar algún trabajo sobre el módulo didáctico utilizando la tarjeta de adquisición de datos de National Instruments.
- Conectar y encender todas las fuentes de alimentación necesarias para el funcionamiento del módulo didáctico.
- Tener cuidado al manipular el módulo didáctico ya que se maneja corrientes elevadas en especial para el control de temperatura.
- Estudiar y conocer en su totalidad lo que se está realizando antes de ejecutar cualquier actividad, para evitar algún daño a los instrumentos.
- Usar programas de software libre para evitar problemas de licencias.

ANEXOS

ANEXO I

DISEÑO DE LA INTERFAZ DE USUARIO USANDO LAS HERRAMIENTAS DE MATLAB

ANEXO II

INSTALACIÓN Y CONFIGURACIÓN DE LA TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

ANEXO III

MANUAL DE USUARIO

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] **Henry David Chávez Zapata**, **Diseño Y Elaboración De** Guías De Práctica De Laboratorio Para La Implementación De Controladores Difusos En El Plc Compact Logix L43, 2011.

[2] **Diego Patricio González Sacoto, Daniel Roberto Noriega Páez**, **Diseño E Implementación De Un Módulo Didáctico Para Control De Nivel, Temperatura Y Caudal Mediante La Red De Comunicación De Campo Devicenet**, 2012.

Manual de usuario de sensor de temperatura

Manual de usuario de sensor de caudal

[3] **National Instruments**, PCI-6221 (DAQ), manual de usuario, "<http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-15/lang/en>".

[4] **Héctor Nelson Acosta**, **Diseño De Controladores Dedicados A La Lógica Difusa**, Octubre De 2006.

[5] **Jantzen Jan**, "Tuning of Fuzzy PID Controllers", Technical University of Denmark: Department of Automation, lecture notes, 1998.

[6] **Z. Lotfí. Fuzzy Logic Toolbox**, User's Guide. Versión 2. The Math Works, Inc. 1995.

[7] **Kuo Benjamín C.**, "Sistemas de Control Automático", Editorial Prentice Hall, Séptima edición, 1996.

[8] **Ibarra Alexander, Acuña Alejandro**, **Diseño e Implementación de un Sistema Controlador de Temperatura PID para la unidad Air Flow Temperature Control System mediante la utilización de la herramienta RTW (Real Time Workshop) de Matlab**, 2010.

[9] **Kevin M. Passino, Stephen Yurkovich**, "Fuzzy Control", Department of Electrical Engineering The Ohio State University, 1998.